

Automatisierte Rechner für Geschossflugbahnen

Übersicht

Einen Flieger mitten im Flug mit Kanonen zu treffen, ist sehr anspruchsvoll. Die Geschosse der früheren schweren Fliegerabwehr fliegen 10 bis 15 Sekunden lang, bei grösseren Kalibern vielleicht 20 Sekunden – da muss die Krümmung der Flugbahn genau bekannt sein. Die Flugbahn ist in den Formkörpern der Kommandogeräte gespeichert, welche den Treffpunkt errechnen – aber vorgängig muss die Bahnkurve zuerst einmal bekannt, d.h. detailliert ausgerechnet sein.

Manuelle Berechnungen für ganze Geschossflugbahnen bedeuten **sehr viel Arbeit**. In kleinen Zeitschritten muss die ganze Flugbahn rechnerisch zusammengestückelt werden. Sind die Intervalle grösser, geht die Rechnung schneller, dafür wird alles ungenauer – und umgekehrt.

Die Berechnungen lassen sich **mechanisiert durchführen**. Die Variablen (Ort, Geschwindigkeit, Flugrichtung etc.) hängen miteinander zusammen, beeinflussen sich gegenseitig, und werden laufend aktualisiert. Eine drehende Welle stellt etwa die fortschreitende Flugzeit des Geschosses dar, und alle weiteren Grössen werden im passenden Massstab aktualisiert. Die Zwischen-Resultate werden abgelesen, fotografiert oder laufend als Kurve aufgezeichnet.

In einer typischen **Schulaufgabe** (Wurfparabel) wird vorerst gezeigt, wie die Arbeitsweise im Prinzip verläuft. Dann werden die damaligen **Summier-Getriebe** vorgestellt, mit welchen die maschinelle Aufsummierung gelingt: mit rotierenden Scheiben, Kugeln, Kegeln etc.

Im **Hauptteil** werden **zwei konkrete mechanische Geräte vorgestellt** zur automatischen Berechnung der Flugbahnen:

> **P. Füsgen** hat im Rahmen seiner Dissertation ein **Flugbahn-Rechengerät entworfen**, vorgestellt **1937** (Firma Rheinmetall-Borsig). Möglicherweise ist es bei der Papier-Idee geblieben.

> **P. Curti** hat die Ideen zu einem Flugbahn-Integraphen **1937** vorgelegt (später mit **F. Dubois** weiterentwickelt). Ein Prototyp wurde bei Haag-Streit gebaut. 1948 wurde das Gerät durch die Schweizer Armee angeschafft, in einer Realisierung durch die Firma Amsler & Cie. SH. Die Anlage stand jahrelang bei der KTA im Einsatz, wurde umgebaut, gewartet; später wurden Erweiterungen für Raketen-geschosse skizziert. Ab 1954 (Pläne) / 1956 (Auslieferung) wurde der Integraph in einer zweiten Form gebaut, mit neu konstruierten Kugel-Integratoren und mit stark verändertem Prinzipschema.

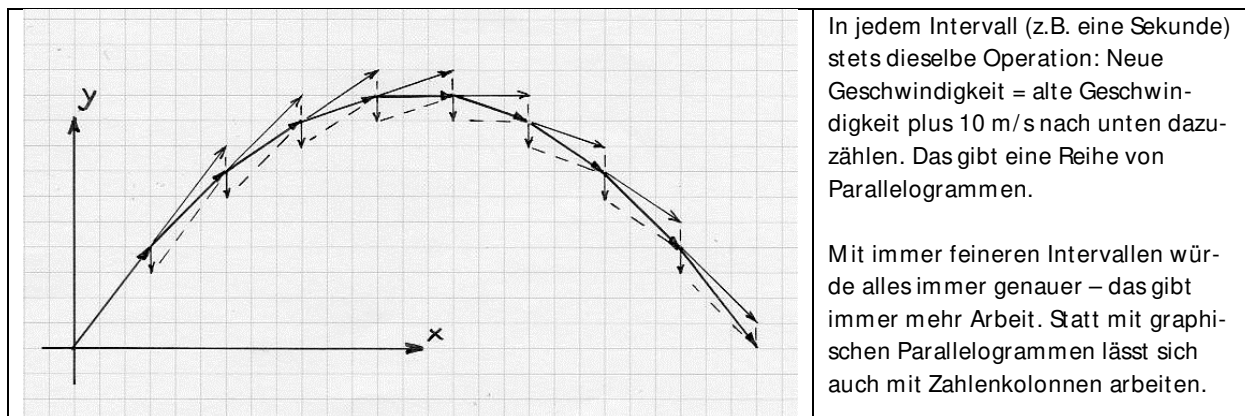
Anhang I zeigt, wie die **Mündungsgeschwindigkeit v_0** der Geschosse im vor-elektronischen Zeitalter gemessen worden ist. Ohne genaue Kenntnis der v_0 lässt sich keine Flugbahn errechnen. >> Seite 18
Anhang II gibt eine Chronologie der Entwicklung des Curti-Gerätes, inkl. Hinweise auf die Neugestaltung des Gerätes 1954/55. >> Seite 19 **Anhang III** beschreibt Unverstandenes >> Seite 22

Der schiefe Wurf – Erinnerungen an den Schulunterricht bei Hans Bützberger

Sekundarschule Langenthal, ca. 1960

Die Grundregel lautet: In jeder Sekunde nimmt die Geschwindigkeit eines schräg nach oben geworfenen Steines um 10 m/s nach unten zu, infolge der Erdanziehung. Man werfe den Stein, zähle nach jeder Sekunde am neuen Ort eine Geschwindigkeit von 10 m/s nach unten dazu – und so weiter, bis der Stein wieder den Boden berührt.

Wir erhalten eine Abfolge der erreichten Geschwindigkeiten am Ende der Sekunden-Intervalle. Da der Weg immer parallel zur Geschwindigkeit verläuft, können wir die erhaltene Bahn auch als Flugbahn, als Ortsansicht betrachten. Jetzt wäre alles mit feineren Intervallen zu wiederholen: das gäbe mehr Arbeit, aber weniger Ecken. Und den Luftwiderstand müsste man auch noch berücksichtigen, wenn man nur wüsste, wie...



Fortlaufende Additionen – ein dauerndes Stückelwerk

Genau wie bei der Schulaufgabe verläuft auch eine „richtige“ Berechnung der Geschossflugbahn. Eine ganze Flugbahn von Hand auszurechnen, bedeutet **stundenlange Arbeit**. Da alles möglichst genau sein soll, müssen die Intervalle der einzelnen Rechenschritte klein gehalten werden. Neben der langen Arbeit wächst mit vielen Rechenschritten auch das Risiko von unvermeidlichen **Fehlern** – und die Fehler pflanzen sich immer weiter fort, sie bleiben in allen folgenden Schritten drin.

Es sind **Angaben zum manuellen Rechenaufwand** gefunden worden. Vermutlich beziehen sich die folgenden Angaben auf eine Flugbahn „bis wieder zum Boden hinunter“, wie es in der Artillerie normal ist. Bei der Fliegerabwehr würde bloss ein kurzes Anfangsstück der Bahn gebraucht – aber wenn die Rechnung zur Anpassung des Luftwiderstandes und zur Genauigkeitskontrolle mit echten Probeschüssen verglichen wird, so muss trotzdem die ganze Flugbahn bis wieder zum Boden hinunter gerechnet werden. Die Rechen-Intervalle sind nicht alle gleich gross – am kleinsten um die Schallgeschwindigkeit herum.

1936 Prof. Cranz: Für eine „Normalbahn“ wird eine Rechenzeit von rund **12 Stunden** benötigt (bei einer Genauigkeit in der Entfernung von 4%)

1937 Dr. E. Pflanz, Stuttgart, stellt eine manuelle halb-graphische Näherungslösung vor, die eine Rechenzeit für eine Normalbahn von **3 bis 4 Stunden** benötigt (gegenüber anderen Verfahren, die zur Erreichung derselben Genauigkeit **10 bis 20 Stunden** erfordern). Einzelne

Zwischenschritte werden nicht mehr gerechnet, sondern mit dem Messzirkel ab speziellen Hilfskurven abgemessen.

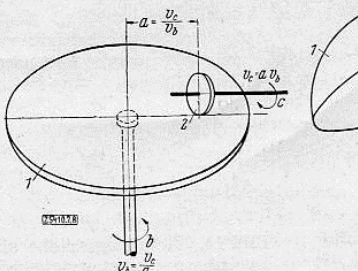

1938 Sektion für Schiessversuche, Thun, beim Studium des Flugbahn-Rechengerätes von P. Füsgen, das weiter unten beschrieben wird:

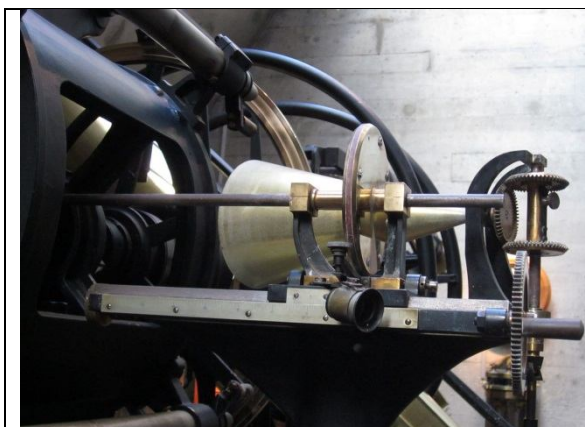
„Eine exakte Flugbahnberechnung (von Hand) erfordert im Mittel **45 Arbeitsstunden**. Eine vollständige Flugbahnkarte eines Flab-Geschützes für *eine* Ladung und *eine* Geschossart erfordert die Berechnung von: 6 Bahnen zur Bestimmung des Formwertes, 9 Bahnen für die Flugbahnkarte des Normalluftgewichtes, 5 Bahnen zur Bestimmung der Korrekturwerte – somit total 20 Bahnen, entsprechend 900 Arbeitsstunden, also **mehr als einen Monat für 4 qualifizierte Kräfte**.“ (Der grosse Wunsch zur Anschaffung eines Rechenautomaten könnte ev. die Angaben für die Rechenzeit bis an die obere Grenze verschoben haben...).
Gedruckt in der Flugbahnkarte der 7.5cm Flab Kan 38 sind 16 Flugbahnen.

Jedenfalls ist klar ersichtlich, welch **enorme Vereinfachung** eine maschinelle, automatische Berechnung der Flugbahnen darstellen würde! Ziel, Idee, Hoffnung: man stelle alle Werte richtig ein (Temperatur, Barometer, Abschusswinkel, Anfangsgeschwindigkeit, Geschossform etc.), dann sollen die Rechnungen automatisch ablaufen – kontinuierlich, ohne jeden Handeingriff, und mit unendlich feinen Rechenschritten. Man muss nur noch die fertigen Zwischenwerte aufschreiben, ev. abfotografieren, ev. die ganze Flugbahnkurve automatisch aufzeichnen lassen.

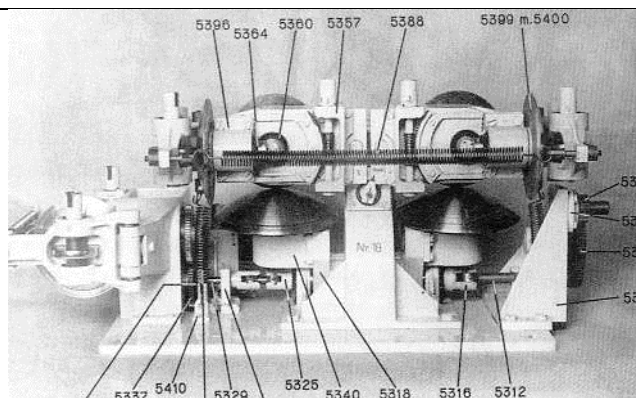
Historische Summiergetriebe – in unterschiedlichen Bau-Formen

Hier werden verschiedene **Getriebe-Formen** vorgestellt, welche „laufend aufsummieren“. Dabei kann der Betrag der immer wieder dazugezählten Grösse fest bleiben (der Ausgang wird linear ansteigen), oder sich laufend und kontinuierlich verändern (am Ausgang steht die integrierte Grösse zur Verfügung). Dass eine Verdrehung linear mit der Zeit ansteigt, ist der Regelfall (Integration über die Zeit), muss aber nicht so sein. Beim Trommelgetriebe entspricht die Zeit einer linearen Bewegung, während die Verdrehung der Trommel den Ausgang darstellt, also umgekehrt als sonst.

 <p>Bild 7 und 8. Beziehungen zwischen im Reibradgetriebe</p> <p>a Abstand der Reibrolle 2 von der Drehachse der Scheibe (Kalotte) 1 b Drehwert der Scheibe (Kalotte) v_b Geschwindigkeit von b c Drehwert der Reibrolle 2 v_c Geschwindigkeit von c</p>	
<p>Reibradgetriebe: Die grosse Scheibe dreht sich z.B. mit konstanter Geschwindigkeit, das kleine Reibrad erfährt je nach dem Abstand vom Zentrum eine andere Geschwindigkeit. Der abgespulte Winkel des kleinen Rades entspricht dem Abstand vom Drehzentrum, aufsummiert über die Zeit: Weg = Geschwindigkeit mal Zeit. Aus Ref. 7.</p>	<p>Reibradgetriebe: Sicher zwei, ev. drei kleine Reibradgetriebe in einem Flabvisier. Die eine rotierende Scheibe sitzt ganz oben horizontal, die zweite links vertikal. Mittels Spindelgewinde wird die Reibrolle verschoben. Die grosse Scheibe wird kleiner als 3 cm im Durchmesser sein. Die mathematische Aufgabe im mechanischen Rechen-Visier ist unbekannt. Flieger- und Flabmuseum Dübendorf. Das optische Visier hinten gehört nicht dazu.</p>



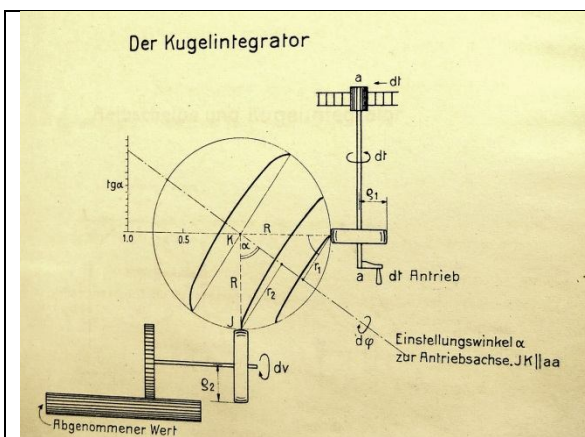
Kegelgetriebe: Das Reibrad im Vordergrund wird verschoben mit dem Handrad rechts unten; Kontrolle oder Ablesung mit der Lupe an der langen Skala mit Nonius. Der Kegel-Umfang steigt, je weiter das Reibrad nach links fährt. Läuft der Kegel mit konstanter Geschwindigkeit, entsteht am Reibrad eine variable, fein einstellbare Geschwindigkeit. Eingebaut in Fernrohr im Uhrenmuseum in La-Chaux-de-Fonds. Kegellänge geschätzt ca. 30 cm.



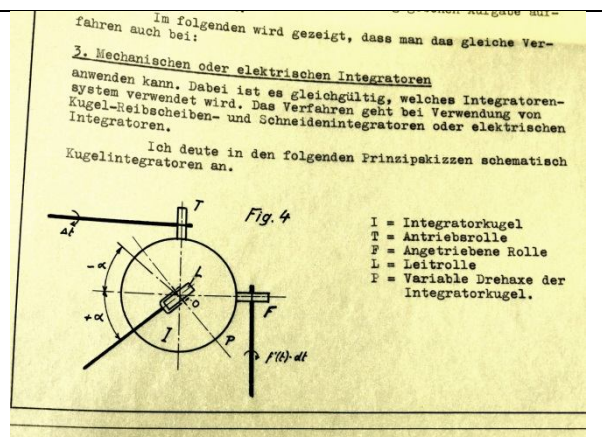
Kugelkalottengetriebe: Das Reibrad oben bleibt immer am selben Ort, die rotierende Kugelkalotte darunter wird weggedreht zum Betrachter hin. Das sei konstruktiv einfacher, als eine saubere Längsverschiebung des Reibrades. Der Umfang der Kugelkalotte am Ort der Berührung wächst nicht linear mit dem Verdrehwinkel. Modul mit zwei Kugelkalotten, aus Ref. 5, deutsches Winkel-Kommando-Gerät WIKOG 9 SH; auch im **KdoGt 40** der Wehrmacht wurde diese Form verwendet.

Zum Kegelgetriebe im Fernrohr:

Es ist eingebaut in ein Meridian-Instrument, das sich nur auf/ab, also um die horizontale Achse drehen lässt (und immer fest nach Süden ausgerichtet bleibt). Das Getriebe kann also nicht die Erdrotation ausgleichen wie bei einem normalen Fernrohr. Hingegen ist es möglich, dass nur die Vertikalgeschwindigkeit der Sterne ausgeglichen wird - vielleicht bieten sich Vorteile zur Zeitbestimmung, wenn der Stern den Meridian im Blickfeld exakt horizontal passiert.

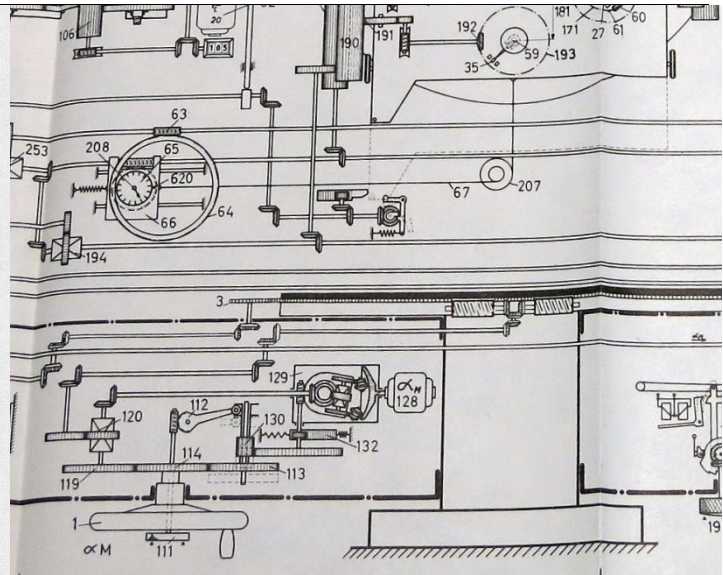


Kugelintegrator nach Amsler: Zwei Reibräder (Input, hier Zeit, und Output) werden rechtwinklig auf eine frei drehbare Kugel geführt, deren Drehachse noch nicht bestimmt ist. Der Umfang am Ort der Reibräder hängt von der Lage der Drehachse ab. Eine ...



...dritte Rolle liegt drehbar auf der Kugel auf, weder angetrieben noch antreibend; ihre Lage (Winkel α) bestimmt die Drehachse der Kugel, und somit das Verhältnis der Geschwindigkeiten der beiden anderen Rollen. **Verwendet im Curti-Dubois-Amsler Integrapph**

Es sind auch andere Amsler-Kugel-Integratoren beschrieben worden, mit anderer Abfolge von Input und Output. Die Skizzen hier entsprechen den Integratoren, wie sie im ballistischen Integrappen von Curti / Dubois eingesetzt worden sind (Pläne mit diesen Integratoren ab 1942, Bau 1948, siehe die Chronologie im Anhang 2, Seite 19)



Trommelgetriebe: Das kleine Rädchen mit scharfer Schneide wird mit schräg gestellter Achse an die Trommel gedrückt, gleichzeitig längs der Trommelachse verschoben. Die Schiefe der Rädchen-Achse ist die Eingangsvariable, der bisher ausgeführte Drehwinkel der Trommel die Ausgangsgrösse. Die Trommel bringt keine Kraft auf für folgende Getriebe, der Trommelwinkel muss vorher elektrisch „nachgeführt“, d.h. elektr. kopiert werden. **Verwendet in der Dissertation Fügen**

Innen-Kugel-Integrator: Nachlaufsteuerung des Handrades zum Seitenwinkel des KdoGt Gamma-Hasler. Der El.Motor 128 dreht die Kugelkalotte mit konstanter Geschwindigkeit. Eine Auslenkung des Handrades 1 verstellt über Zahnräder die Schiefe der beiden Abtastrollen innen. Deren Drehung wird in einem Differentialgetriebe verglichen, die Differenz der Umdrehungszahlen geht aus der Kapselung weiter zum Differentialgetriebe 120, von dort weiter als fein einstellbare Drehung des ganzen KdoGt. So realisiert ab Modell 1943. Zuunterm fester Erdboden, verbunden mit der Grundplatte. Bild: Schema KdoGt 43/ 50R im Flieger-Flab-Museum Dübendorf.

Reibradgetriebe:	Linearer Abstand der Reibrolle vom Zentrum der Scheibe
Kegelgetriebe:	Linearer Abstand der Reibrolle von der Kegelspitze
Kugelkalotten-Getriebe:	Auskippen der drehenden Kugeloberfläche um einen Winkel
Kugelintegrator nach Amsler:	Einstellen der Kugelachse mit Hilfe der Führungsrolle, ein Winkel
Trommelgetriebe:	Einstellen der Schräglage des Schneiderädchens, ein Winkel
Innen-Kugel-Integrator:	Einstellen der Asymmetrie der beiden Abtast-Rollen, ein Winkel

> Das Gerät wurde im Rahmen der Dissertation ausgedacht, aber bis 1937 womöglich nicht wirklich gebaut. Ob es später jemals in dieser oder ähnlicher Form konstruiert und in Einsatz genommen

wurde, ist nicht bekannt. Dass bis zur Dissertation noch nichts konstruiert worden ist, ist aus einzelnen Worten zu schliessen: Die Darstellung weicht in Einzelheiten von der „geplanten Ausführung“ ab. So sind (im Gegensatz zum gezeichneten Schema) durchwegs Kugellager „vorgesehen“ (Diss. p. 14). Der Mathematik-Prof. Josef Heinhold (München) weiss auch 1943 nicht, ob sich das Füsgen-Gerät je praktisch bewährt hat.

> Ein Bild (3 MB) zum Gesamtschema kann separat geliefert werden; vielleicht ist es besser zu verwenden (Vergrösserungen, Teile daraus nehmen usw.), wenn es nicht in einem Word- oder PDF-Format eingebaut vorliegt. Hier werden nur Teilausschnitte gezeigt.

> Die Verschaltung der Teile und die Rückkopplung der Variablen kommt beim Füsgen-Gerät nicht schön zum Ausdruck. Sie scheint gleich zu sein wie beim nachfolgend beschriebenen Gerät von Amsler in Schaffhausen. Dort gibt es klare Bilder (s. unten, Seite 13). Einzig der Luftwiderstands-Teil unterscheidet sich deutlich bei den beiden Anlagen.

Aufbau:

Das Gerät wird auf vier Etagen montiert. Im **vorderen** Teil ruht das Gerät **fest auf dem Tisch** (Etage 1 bis 3), im **hinteren** Teil sind auf Etage 2 bis 4 die Getriebe auf einem **beweglichen**, Motor-getriebenen Schlitten aufgebaut, welcher von links nach rechts am festen Teil vorbeifährt.

Etage 1 (nur fester Teil): Zeit-Motor, bewegt den ganzen Schlitten. Diverse Start-Stop-Einrichtungen.

Etage 2: Integrationstrommeln für x und für y . Die Trommeln und die Ablesung der Werte (Grob- und Feinbereich) liegen auf dem festen Teil, die Steuerung für die Schrägstellung der Rädchen, welche die Integratoren beeinflussen, liegen alle auf dem fahrenden Schlitten.

Etage 3: Integrationstrommeln für v und Winkel ϑ . Verteilung wie oben.

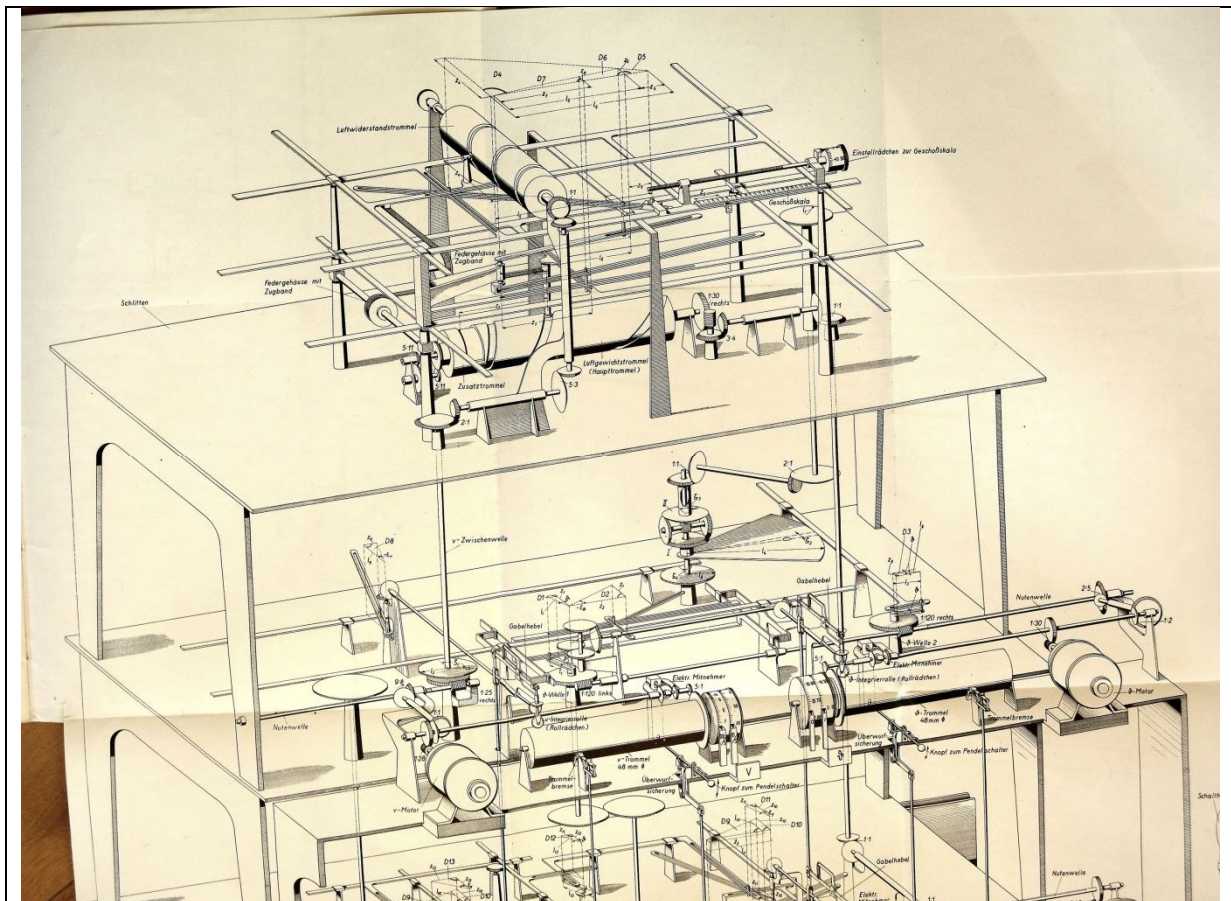
Etage 4: Luftwiderstands-Rechner, nur auf dem Schlitten. Walzen zur Speicherung von Luftwiderstand und Luftdichte. Einstellen der Geschossform. Der feste Teil hat nichts auf dieser obersten Etage.

Zusätzlich hat der feste Teil zwei Handhebel zur manuellen Bedienung: Start, Stop, Einstellung der Anfangswerte, Bremsen der Trommeln lösen oder feststellen, Rollrädchen abheben, usw. – alles gewissermassen ausserhalb des Rechenganges.

Die vier Trommeln treiben die leichtgängigen **Ablese-Anzeigen** an für die momentanen Werte, je mit Grob- und Feinbereich. Wo die Ausgänge der Integratoren mechanisch weiterverwendet werden, wird ein **Kraftverstärker** benützt, d.h. eine **elektrische Nachführung der Werte**: Der Ausgang der drei Trommeln für y , v , ϑ bedient feine Elektrokontakte, welche einen Elektromotor steuern (vor- und rückwärts), dessen angetriebene Welle dem Trommel-Ausgang jederzeit exakt nachfolgt.

Es folgt das Bild der oberen Etagen 4 (Luftwiderstandsrechner) und 3 (Steuerung der Variablen v und ϑ , Geschwindigkeit und Flugwinkel):

(Nächste Seite)



Die oberste Etage 4 befindet sich ganz auf dem fahrenden Schlitten. Bei Etage 3 sind die Integrationstrommeln für v und ϑ , ihre Nachführmotoren (aussen) und ihre Ableseeinheiten (innen) auf dem festen Teil der Anlage. Die Luftwiderstandstrommel zuoberst hängt von der Geschossform ab und muss bei einem anderen Kaliber ausgewechselt werden; sie verdreht nach der Geschoss-Geschwindigkeit v . Die untere Trommel, in Fahrtrichtung ausgerichtet, gibt das momentane Luftgewicht an - sie verdreht nach der Höhe y . Vertikale Wellen zur 4. Etage: links v , Signal führt nach oben; rechts kürzer Luftwiderstand, nach unten; rechts länger y , das Signal kommt von der Integriertrommel y ab Etage 2 nach oben, und ist motorverstärkt.

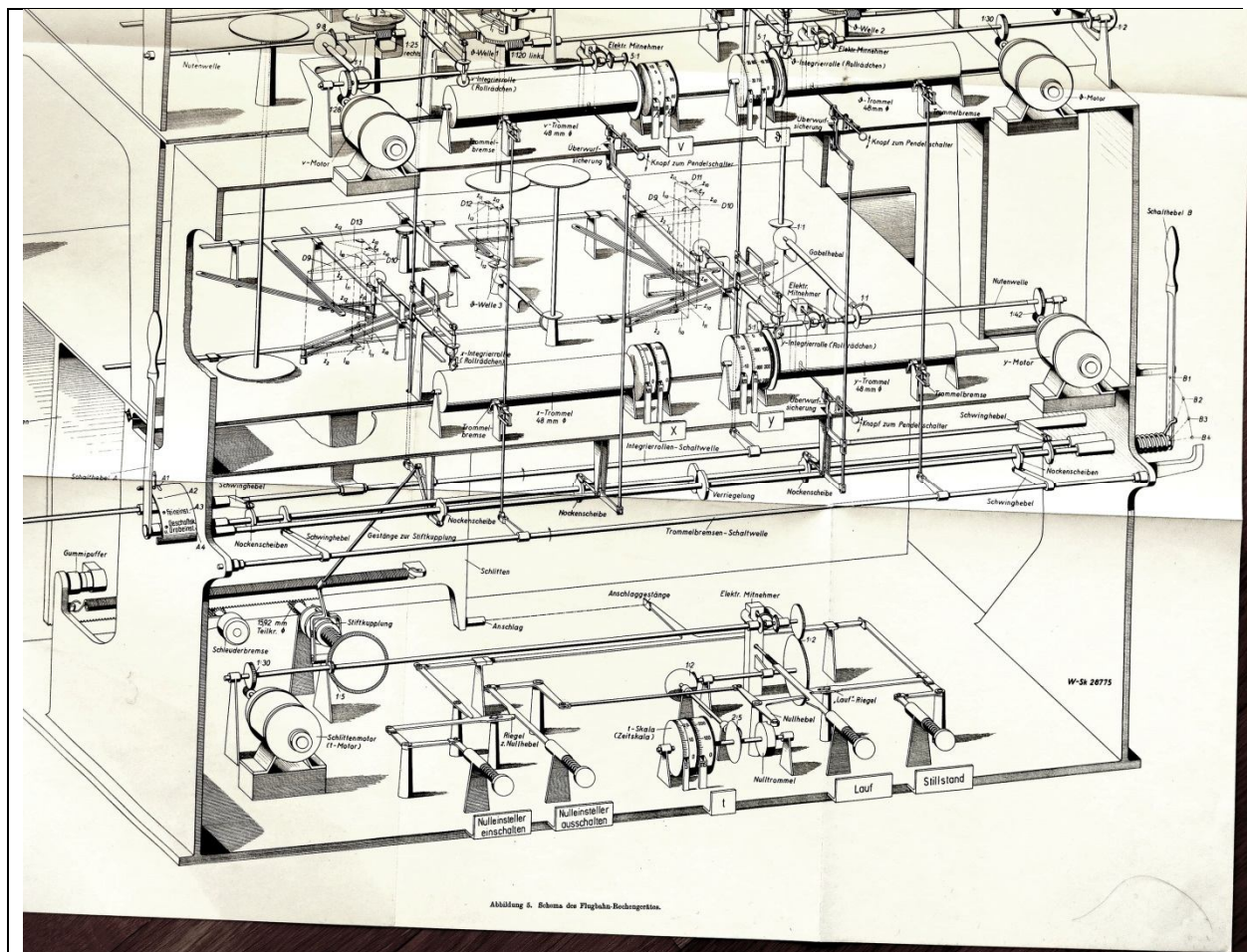
Der Luftwiderstandsrechner auf der obersten Etage wird **weiter unten noch genauer besprochen**.

Die Aufgabe der Getriebe neben / hinter den Integrationstrommeln (auf gleicher Höhe) besteht darin, jeweils die Schrägstellung der kleinen Rädchen richtig vorzunehmen, die in Kontakt mit den Trommeln sind und auf ihr abrollen. Fährt der hintere Teil des Gerätes mit zunehmender Rechen- resp. Geschossflugzeit vorbei, so drehen die Rädchen die Trommeln im richtigen Mass, so dass die Verdrehung der Trommeln jederzeit dem aktuellen Wert der Variablen entspricht.

Bis zu einer Schrägstellung der Rädchen von 40° soll eine saubere Verdrehung der Trommel noch möglich sein. Zur Sicherheit werden bei der Füsgen-Maschine die Rädchen nie mehr als um 30° aus der Fahrtrichtung ausgelenkt.

Zeitmassstab:	200 mm ganzer Schlittenweg	entsprechen 2 Sekunden Geschossflugzeit
	6 Sekunden Rechenzeit	entsprechen 2 Sekunden Geschossflugzeit
	33.33 mm / sec	entsprechen der Fahrgeschwindigkeit des Schlittens

Untere Etagen 3, 2, 1: Schema siehe nächste Seite



Die Etagen 3, 2 und 1. Zuunterst ganz links: Elektromotor treibt den beweglichen Schlitten an, mit der Zahnstange gleich unter der langen, dunklen Spiralfeder. Die vier Integriertrommeln sitzen auf dem festen Teil, alles dahinter ist auf dem beweglichen Schlitten. Ganz links und ganz rechts aussen sind zwei Handhebel, mit denen mittels Nockenscheiben die Anlage gesteuert wird: Freigabe der Variablen zur Einstellen der Anfangswerte, Bremsen für die Trommeln, Abheben der schrägen Rollrädchen von den Trommeln (die Rollrädchen fahren mit dem Schlitten mit), Rückführung des Schlittens bei eingefrorenen Rechenwerten für die nächste Etappe, etc. Hinter dem Hebel links ist die vordere Führung des Schlittens sichtbar, hinten gibt es noch eine. Geschätzte Breite der ganzen Anlage: ca. 1.2 m, Höhe: ca. 1.5 m (ab den 20 cm Fahrweg des Schlittens geschätzt).

Ausgabe der Daten:

Alle Zwischenwerte der gerechneten Flugbahn (x, y, v, ϑ, t) müssen mit Grob- und Feinbereich an den Doppelrad-Skalen **von Auge abgelesen und sofort von Hand aufgeschrieben werden**. Dies für die ganze Flugbahn, von Anfang bis Schluss. Vermutlich muss die Maschine dabei jedesmal angehalten, anschliessend an den Unterbruch wieder gestartet werden. Es wird keine Flugbahn mit einem Stift auf Papier aufgezeichnet. In diesem Sinne ist das Füsgen-Gerät dem Amsler-Integraphen (siehe weiter unten) klar unterlegen. - Das Aufzeichnen der gerechneten Flugbahn auf Papier wäre eigentlich bloss eine zusätzliche Kleinigkeit.

Datenbereiche, Maßstäbe:

Alle vier Integrationstrommeln drehen sich mehrmals herum, um eine Flugbahn abzuspulen. So entspricht etwa der ganze Umfang der Flugwinkel-Trommel (ϑ) nur drei Grad, d.h. wenn der Schuss einer Flab-Kanone anfänglich mit 60° gegen die Horizontale abgefeuert wird, so muss sich die ϑ -Trommel **20 mal ganz herumdrehen** bis zum Punkt der Kulmination, wo das Geschoss horizontal

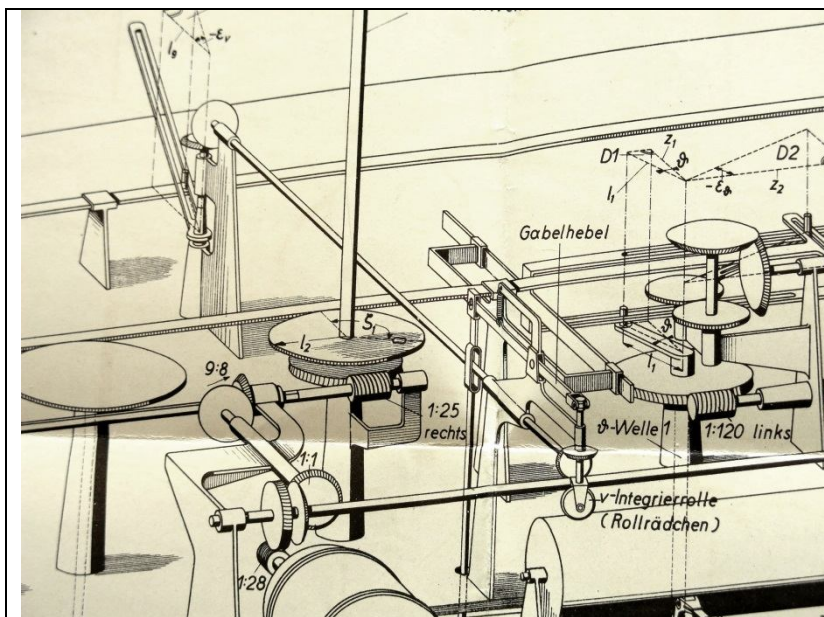
verläuft, dann nochmals ca. 20 mal in derselben Richtung, bis das Geschoss wieder zu Boden fällt (zur Veranschaulichung – symmetrisch ist die Flugbahn nur ohne Luftwiderstand). Um eine Horizontal-distanz von 10 km zurückzulegen, muss sich die x-Trommel 10 mal ganz herumdrehen, usw.

Mechanische Realisierung der Zeit: Ist der Schlitten um die ganze Trommellänge gefahren, müssen alle Trommeln gebremst werden, die Integrier-Rädchen bei blockierter Schräge von den Trommeln abgehoben, der Zeit-Motor wird ausgekuppelt, dann wird der Schlitten per Federkraft in die Start-position zurückgezogen, erneut mit dem Motor gekuppelt, und wenn alle Blockierungen bei den Integriertrommeln gelöst sind, so kann die nächste Etappe gefahren werden. Ein Durchlauf (Strecke von 20 cm) entspricht der Flugzeit des Geschosses von 2 Sekunden. Artillerie: z.T. 20 bis 30 Durchläufe!!

Details und Einzelheiten:

Jetzt schauen wir genauer hin – die Beschleunigung beeinflusst die Geschwindigkeit

Zuerst eine relativ einfache **Ansteuerung eines Rollrädchens**, welches die Geschwindigkeits-Trommel (unten rechts im Ausschnitt) bedient. Die kurze, vertikale Spiralfeder wenig rechts der Bildmitte zieht hinten den kippbaren Gabelhebel hoch, so dass das Rädchen an die Trommel gedrückt wird. Zieht die Vertikalstange (rechts von „1:25“) nach unten, so hebt das Rollrädchen ab – ohne aber die Winkel-Information zu verlieren (denn die Zahnräder oberhalb des Rädchens bleiben im Eingriff).



Die Geschwindigkeit (Trommel rechts unten) wird aktualisiert, indem laufend die Beschleunigung aufsummiert wird. Links unten abgeschnitten der v-Motor, er kopiert die Position der v-Trommel, führt sie durch die Vertikalstange bis zuoberst zum Luftwiderstands-Rechner.

Das leicht verdreht stehende Rollrädchen wird mit dem Schlitten nach rechts bewegt, deshalb dreht sich die Trommel. Der Tangens des Winkels am Rollrädchen muss proportional zur Beschleunigung sein. Auf die Schiebestange ganz hinten wird die Total-Beschleunigung in Flugrichtung addiert: Teil der Erdanziehung plus Luftwiderstand. Der Zapfen in der hohlen Führungsschiene macht, dass der tan des Drehwinkels zum Rollrädchen gerade der Beschleunigung entspricht (Dreieck zuoberst).

Die Geschwindigkeit bestimmt den Weg:

Jetzt wird es auch leicht komplizierter – wir wollen der Maschine ja die Ehre antun! Im Bild unten die x-Trommel (Horizontaldistanz des Geschosses) mit der x-Ablesung in km und in m. Die x-Trommel muss laufend die momentane x-Komponente der Geschwindigkeit über die Zeit aufsummieren. Zur Veranschaulichung mit falschen Zahlen: 5 m/s gibt alle 0.1 Sek. einen Wegzuwachs von 0.5 m – das wird über alle Sekunden aufsummiert, während die Geschwindigkeit selber ev. laufend abnimmt.

Zur Füsgen-Maschine stellt die Sektion für Schiessversuche in Thun im März 1938 fest, dass man den Luftwiderstand nicht wie bei Füsgen annehmen dürfe zu einer Konstanten c (mit Luftdichte ρ , Kaliber etc.) mal eine Funktion der Geschoss-Geschwindigkeit, sondern man müsse schreiben c mal eine Funktion der Mach'schen Zahl. In grösseren Höhen sinkt der Luftdruck, aber auch die Temperatur, und deshalb ist auch die Schallgeschwindigkeit nicht überall gleich. Man müsste zusätzlich einen beliebigen Temperaturgradienten in jeder Höhe annehmen und in die Maschine eingeben können. So ist es beim Amsler-Integraph (siehe weiter unten) auch gemacht worden.

Trotz dieser Verbesserungswünsche schreiben die Fachleute der Schiessversuche aus Thun am 29.3.1938:

„Von den bisher bekannt gewordenen ballistischen Rechenmaschinen ist diejenige von Füsgen die erste, von welcher wir glauben, dass sie praktisch realisierbar ist.“

Erneut ein Hinweis darauf, dass das Gerät bis 1937 oder 1938 nur ausgedacht, aber nicht gebaut worden ist.

Vorläufer-Versuche:

P. Füsgen erwähnt vier Vorläufer-Geräte oder Vorläufer-Ideen, ohne dass man Genaues erfährt. Offenbar wurde meistens die Luftdichte als Funktion der Höhe als konstant belassen (oder dies in erster Näherung, dann waren weitere Approximationen nötig)

L. Filloux: Aufzeichnen von Hodograph $v(\vartheta)$ und Flugbahn $y(x)$, 1908. Ob das beschriebene Gerät ausgeführt worden ist, weiss Füsgen nicht.

L. Jacob: Das Gerät wurde tatsächlich ausgeführt, zeichnet den Hodographen $v(\vartheta)$, 1911, Paris.

E. Pascal: Zeichnet geänderten Hodographen: $\log(v)$ gegen $-\sin(\vartheta)$. Es gibt ein Bild eines ausgeführten Gerätes, 1914, Napoli

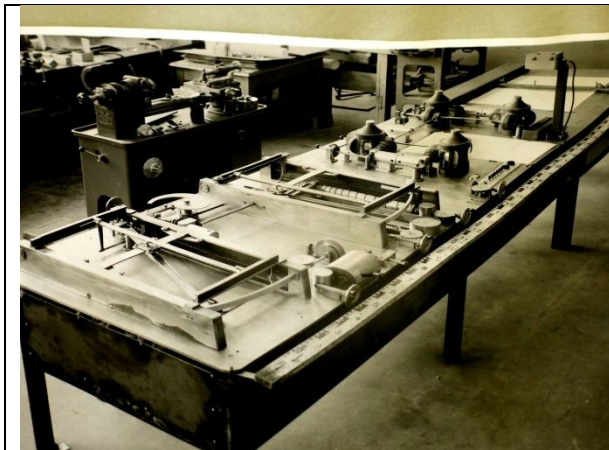
A. Perrin: Geschwindigkeit und Verzögerung werden in rechtwinklige Koordinaten zerlegt. Planimeterrollen, Füsgen ahnt Schwierigkeiten bei der reibungsarmen Verschiebung dieser Rollen parallel zur Achse. Das Gerät erstellt keine graphischen Aufzeichnungen. 1922, Frankreich. Keine Angaben darüber, ob das Gerät je realisiert worden ist.

Der Flugbahn-Integraph nach System Curti-Dubois-Amsler, genannt „Mariandl“

Aufbau

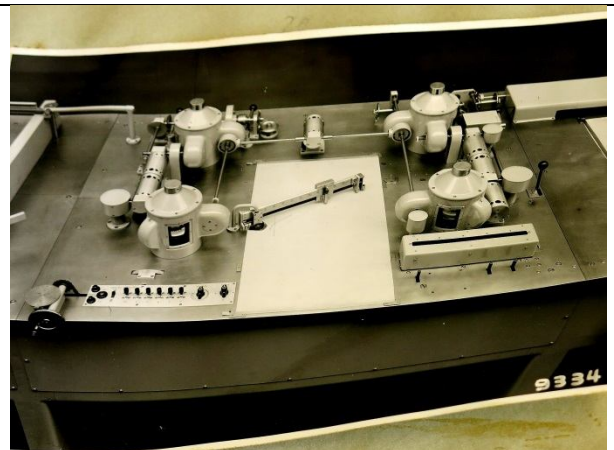
Der Rechner besteht aus drei nebeneinander stehenden Tischen, jeder ist ca. 1.30m breit. Auf dem Tisch links befindet sich der ganze **Luftwiderstandsrechner**, auf dem Tisch in der Mitte sind als Kernstück die vier **Integratoren** (= Aufsummierer, später auf deren 5 umgebaut) sowie eine Zeichenvorrichtung für die Kurve $v(\vartheta)$ genannt Hodograph, und auf dem Tisch rechts findet die rechtwinklige **Aufzeichnung der Flugbahn** auf Papier statt, d.h. $y(x)$, die Höhe als Funktion der Horizontalabstand.

Die mechanischen Operationen sind präzise – und gleichzeitig empfindlich. Die Kugel-Integratoren mit ihren feinen Rollen (vgl. Seite 4) erzeugen nicht genügend Kraft, um die Drehwerte weiterzugeben und am nächsten Tisch ein weiteres Getriebe anzutreiben. **Kraft, Schlupf und Präzision ertragen einander nicht.** Aus diesem Grund werden empfindliche Werte sofort „**elektrisch nachgeführt**“, d.h. es wird mittels feiner Kontakte ein Elektromotor so gesteuert, dass eine mit Kraft angetriebene Drehwelle immer exakt dieselbe Stellung einnimmt wie die zuvor ermittelte Grösse. Der Motor hat dann genügend Kraft, um die nachfolgenden Stufen anzutreiben (auch gegen etwas Widerstand).



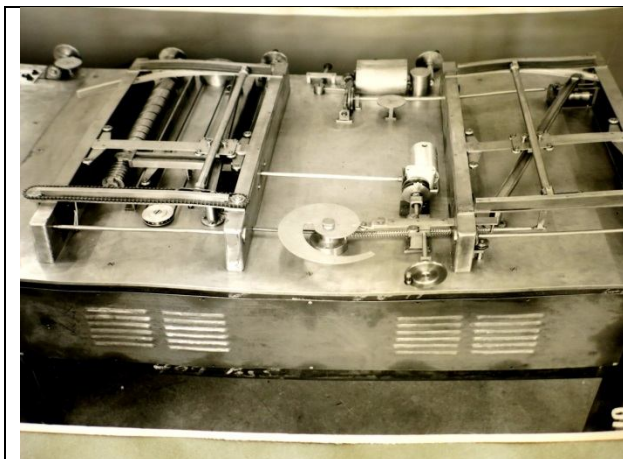
Die Gesamtheit der drei Tische, links der **Luftwiderstands-Rechner**. In der Mitte die vier Integratoren. Ganz zuhinterst die normale Aufzeichnung der Flugbahn $y(x)$, hier nicht weiter besprochen, da eher ohne Rätsel oder Wunder. Rechts über den Integratoren die Kamera, welche die Zwischenwerte auf Film festhält. Unter den Tischen gibt es noch weitere Drehwellen und Getriebe.

Bilder aus Ref. 2 (zeitgenössische Papierfotos fotografiert)

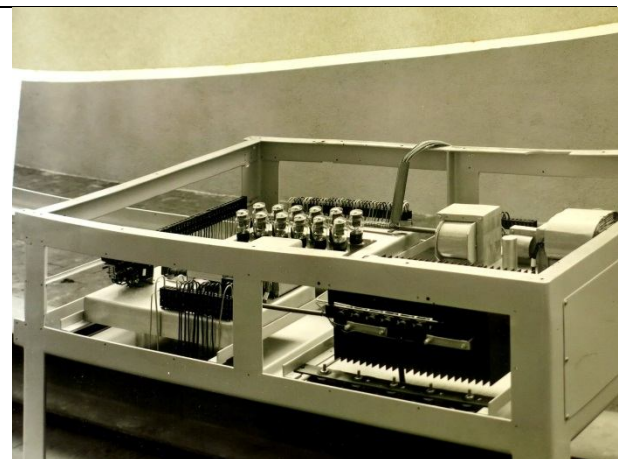


In der Mitte die vier **Kugel-Integratoren**, rings um die etwas abstrakte Aufzeichnung der Kurve $v(\vartheta)$ auf Papier, genannt Hodograph. Die vier Integratoren bilden, von oben links nach unten rechts: Geschwindigkeit schräg, x (Horizontalabstand), Steigungswinkel ϑ , y (Höhe). Rechts unten die Ziffernanzeige für alle Zwischenwerte auf einer Zeile (die Kamera darüber ist entfernt). In der Mitte oben der Zeitmotor, welcher die Zeit zu allen vier Integratoren führt.

Die **Kamera** erfasst im selben Bild die gegenwärtigen Zahlenwerte für fünf Variablen t , ϑ , v , x , y . Die Kamera kann so gesteuert werden, dass sie nach festen Zeiten (alle 0.1 .. 1 Sek.) ein Bild macht, oder je nach 100m oder 500 m in x - oder in y -Richtung. Auf beiden Papierkurven können auch Zeitmarkierungen gesetzt werden.



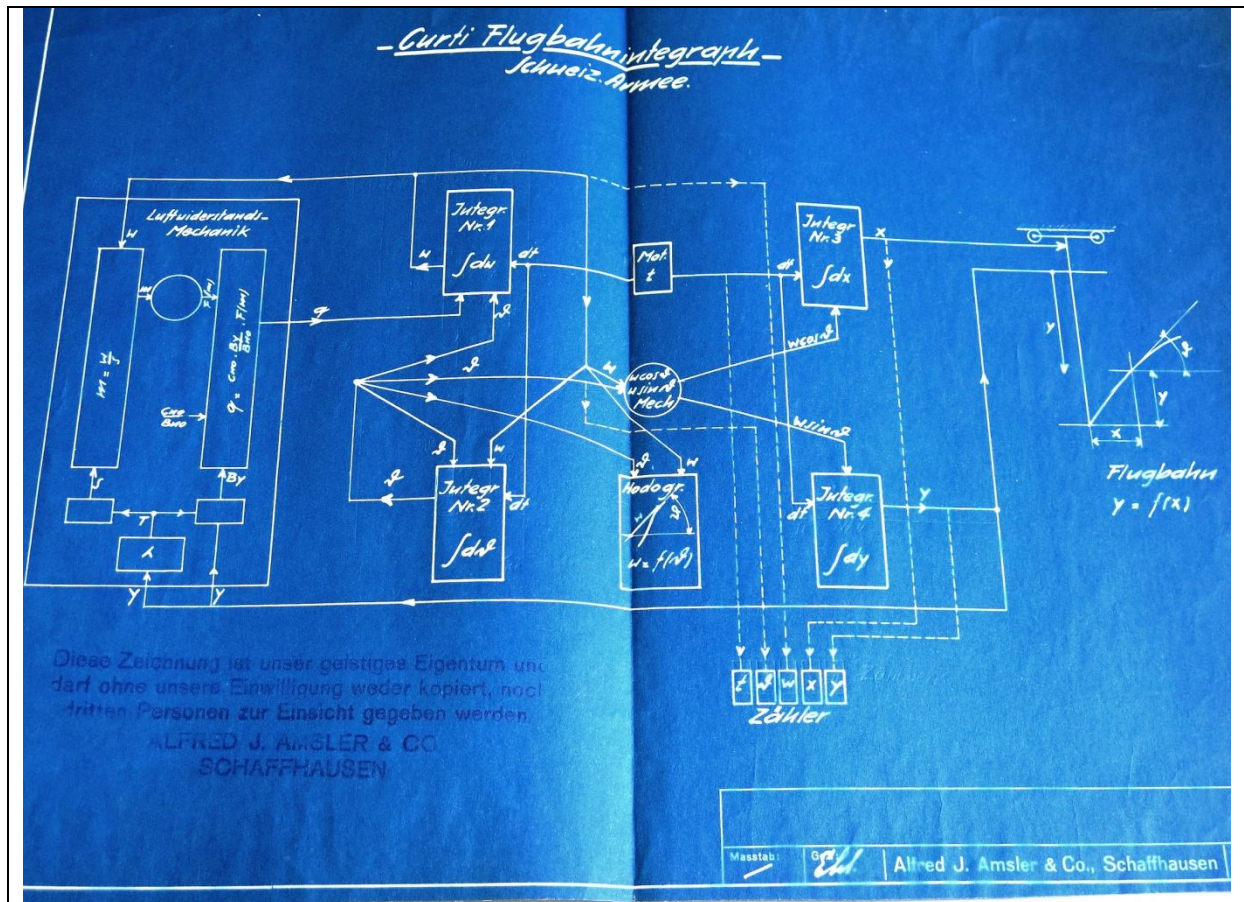
Veloketten-Technik und Zugbänder (links) – im Zusammenspiel mit Elektronenröhren. Im Vordergrund die auswechselbare Schablone, die für jeden Geschosstyp die Geschwindigkeitsabhängigkeit des Luftwiderstandes gibt. Von rechts her tastet ein feines Rädchen die Schablone ab – der Nachführmotor (rechts dahinter, hell) verstärkt den abgelesenen Wert und gibt ihn über die feine Welle nach links weiter.



Damit die feinen Kontakte der elektrischen Nachführung nicht vom kräftigen Motorstrom durchflossen werden, sind **Elektronenröhren** dazwischen geschaltet. Die mechanischen Kontakte gehen auf die Gitter der Röhren, und die Röhren schalten dann die Ströme für die Motoren (in Richtung vorwärts / rückwärts braucht es zwei Röhren). Links hinten sind 12 Elektronenröhren.

Bilder 956, 973: Elektronenröhren sind bereits ab 1948 eingesetzt. Der Ausgang y braucht die doppelte Leistung, hat deshalb zwei Motoren im Tandem, „jeder mit eigenem Paar Elektronenröhren“ – gibt zusammen 12 Röhren, wie abgebildet.

Verschaltung: Wie die Variablen miteinander zusammenhängen



Schema der Rechengeräte im Curti-Integrator. Die vier Integratoren sind in den Ecken eines Quadrates und aktualisieren (im Uhrzeigersinn) die Geschwindigkeit (hier als w bezeichnet), die x -Koordinate, die Höhe y , und den Winkel der Geschossflugbahn ϑ ab der Horizontalen. Alle Integratoren spüren dieselbe Zeit (Drehwelle ab zentralem Motor oben). Der Winkel ϑ wird in jedem anderen Integrator auch gebraucht. Rund im Zentrum: die w -Zerlegung nach horizontal (für x) und vertikal (für y). Links ist die Luftwiderstands-Mechanik, mit Luftdruck (rechts) und Machzahl (links), rund eine Schablone, die für jedes Geschoss neu gerechnet werden muss. Links ganz unten: Die Temperatur am Ort des Geschosses wird errechnet ab einstellbarem Gradienten (z.B. $0.5^\circ\text{C}/100\text{m}$). Ganz zuunterst fünf Variablen für die Kamera. Plan gezeichnet: 12.8.1948.

Blau: Diazokopie

Luftdichte, Luftwiderstand

Die **Annahmen zum Luftwiderstand** sind von grosser Wichtigkeit bei der Berechnung einer Flugbahn. Und gerade hier gibt es grosse Unsicherheiten...woher will man im vor-elektronischen Zeitalter genaue Informationen zur Bremsung eines Überschall-Geschosses haben? (Vgl. auch p. 22/23)

Bezüglich der Berücksichtigung des Luftwiderstandes **unterscheiden** sich die beiden Geräte Fügen / Amsler **deutlich**. Es ist hier unmöglich, alle Unsicherheiten im Zusammenhang mit dem Luftwiderstand genau zu diskutieren, aber prinzipielle Unterschiede zwischen den beiden Geräten sollen aufgezeigt werden.

	Füsgen	Curti-Dubois-Amsler
Einmalig eingestellt von Hand >>>	Geschoss-Form (Kombination verschiedener Faktoren)	Schablone für Formfaktor als Fkt. der Machzahl; Temperatur-Gradient: ...°C/ 100 m
Input von den Variablen her >>>	v, y (d.h. Geschwindigkeit und Höhe)	v, y
Innerhalb des Luftwiderstands-Rechners wird berechnet >>>	Luftdichte (aus der Höhe y)	Temperatur absolut (aus y und Temp.-Gradient). Barometerdruck (aus y). Schallgeschwindigkeit s (aus Temperatur). Mach-Zahl (aus s und v)
Output	Luftwiderstand	Luftwiderstand

Der Mechanismus des **Luftwiderstands-Rechners der Füsgen-Anlage** lässt sich in seinen Grundzügen verstehen. Die damalige Tradition will, dass der Luftwiderstand eines fliegenden Geschosses aufzufassen sei als Produkt dreier Faktoren:

Gesamte Bremsbeschleunigung = Formfaktor mal Geschwindigkeitsfaktor mal Dichtefaktor.

Formfaktor: ist nur von der Form des Geschosses abhängig: Geschoss-Querschnittsfläche mal Berichtigungswert mal Formwert durch die Geschossmasse (so ungefähr...seitenlange Erklärungen). Ein derartiges Produkt ist beim Füsgen-Gerät am **Handrad** an der „Geschoss-Skala“ einzustellen.

Geschwindigkeitsfaktor: eine Funktion der Geschwindigkeit, oft geschrieben als $K(v) \cdot v^2$, weil man historisch schon lange vermutete, der Luftwiderstand erhöhe sich mit dem Quadrat der Geschwindigkeit. Das stimmt bloss bei kleineren Geschwindigkeiten; kommt man in die Nähe der Schallgeschwindigkeit, steigt der Luftwiderstand markant an, d.h. das $K(v)$ steigt an bis zur Schallgeschwindigkeit, bleibt dann annähernd konstant bei noch höheren Geschwindigkeiten.

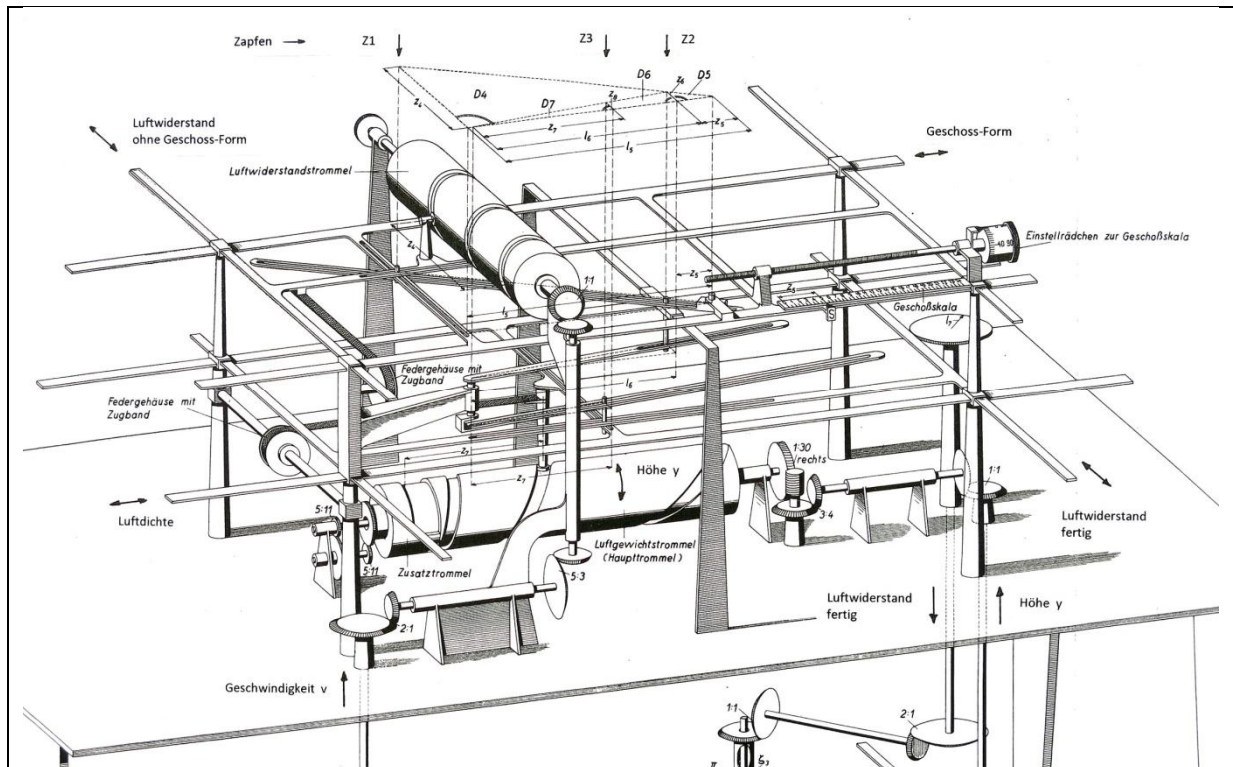
Dichtefaktor: direktes Verhältnis der Luftdichte in der aktuellen Flughöhe zur Normal-Luftdichte, d.h. die Bremskraft ist proportional zur Luftdichte. Hoch oben in der Flugbahn ist die Luftbremsung geringer – aber bei allen Geschossformen und bei allen Geschwindigkeiten soll die halbe Luftdichte auch nur die halbe Bremswirkung ergeben.

Bei Curti-Dubois-Amsler wird dagegen das Verhältnis von Barometer-Druck zu Normaldruck genommen, was nicht exakt dasselbe gibt wie bei der Luftdichte. Gemäss tabellierter Normalatmosphäre nimmt der Luftdruck von Meereshöhe bis auf 5'500 m um die Hälfte ab, dagegen muss man bis auf 6'650 m steigen, bis die Luftdichte nur noch halb so gross ist. Die Temperatur ändert sich eben auch mit der Höhe.

Wie gut eine Näherung dieser drei voneinander unabhängigen Faktoren der Realität entspricht, bleibt vorerst offen. Vielleicht dienen die Näherungen auch nur dem Ziel, die Flugbahnberechnung einigermaßen in einem akzeptablen Rahmen zu halten, d.h. überhaupt zu ermöglichen.

Die KTA (Sektion für Schiessversuche, Thun) rechnet beim Geschwindigkeitsfaktor nicht mit einer Funktion der Geschwindigkeit $F(v)$, sondern mit $F(M)$, d.h. der Luftwiderstand soll gemäss dieser Ansicht von der **Machschen Zahl** des Geschosses abhängen (Vielfaches der Schallgeschwindigkeit). Da die Temperatur mit der Höhe abnimmt, wird auch die Schallgeschwindigkeit mit der Höhe leicht geringer (typ. 3% Abnahme bei 3000 m Aufstieg), so dass die Machzahl 1 höher oben bei geringerer Geschwindigkeit erreicht wird.

Nun folgt die **Beschreibung des Luftwiderstands-Rechners der Füsgen-Anlage** anhand des Original-Schemas, bei dem gewisse Variablen noch zusätzlich bezeichnet sind:



Oberste Etage des Füßen-Gerätes mit dem **Rechner für die Luftbremsung**. Eingänge: Momentane Flughöhe y von rechts unten, sowie momentane Geschwindigkeit von links unten her. Diese Werte werden je an eine drehbare Walze geführt, für die Luftdichte in entsprechender Höhe, resp. für den Luftwiderstand (ohne Formfaktor). Ausgang: Fertige Luftbremsung d.h. Beschleunigung, zu welcher später noch die Erdbeschleunigung in Bahnrichtung addiert wird (im Differentialgetriebe weiter unten, abgeschnitten): bei steiler Flugbahn bremsst oder beschleunigt das Eigengewicht stärker als bei flacher.

Berechnung des momentanen Luftwiderstandes:

- > Aus der Höhe ist die dortige Luftdichte zu ermitteln
- > Aus der Geschwindigkeit wird der „Normalwiderstand“ ermittelt
- > Von Hand wird am Einstellrädchen die Geschossform eingestellt
- > Multiplikation dreier Faktoren

Die aktuelle Geschwindigkeit des Geschosses verdreht die Luftwiderstandstrommel so, dass der Auslesestift links hinten den dazu passenden „tabellierten“ Luftwiderstandswert auf das Gestänge überträgt. Zapfen Z1 verstellt dadurch die Schräge der Diagonal-Schiene. Mit ähnlichen Dreiecken D4 und D5 unmittelbar unter der Luftwiderstandstrommel wird das Produkt aus dem Luftwiderstand (ohne Geschossform) und dem Formfaktor gebildet und über Zapfen Z2 nach unten geleitet (die Proportion beim ähnlichen Dreieck kann auch als Produkt geschrieben werden). Mit der Hilfe zweier beweglicher Führungsschienen weiter unten, die immer exakt dieselbe Richtung halten, wird der Luftwiderstandswert jetzt noch auf die momentane Luftdichte je nach Flughöhe reduziert – der Zapfen Z3 verschiebt sich entsprechend der Luftdichte und gibt dadurch den fertigen Endwert des Luftwiderstandes auf ein Translations-Gestänge. Am Schluss wird dieser Wert mit einem Zahnrad (unter der Geschoss-Skala) in eine Rotation umgewandelt, die nach unten abgeführt wird.

Im Bild abgeschnitten: ein Differentialgetriebe addiert noch das Geschossgewicht mal $\sin \vartheta$, das (je nach der Steigung der Geschossflugbahn) auch zur Bremsung des Geschosses beiträgt, resp. bei negativem Winkel ϑ auch wieder beschleunigt, sobald das Geschoss seine maximale Höhe überschritten hat.

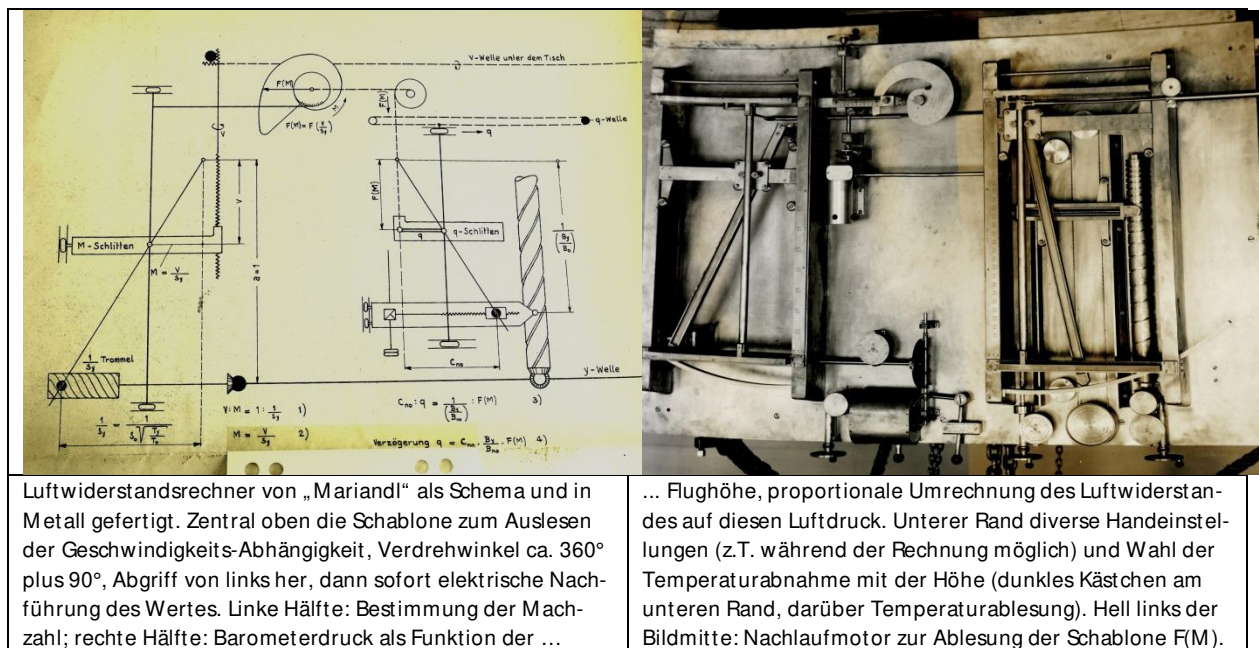
Luftwiderstand bei der Anlage Curti-Dubois-Amsler, genannt „Mariandl“:

Hier wird etwas mehr Aufwand betrieben:

Es wird aus der Höhe des Geschosses der **Barometerdruck** bestimmt sowie die **Lufttemperatur**, wobei die Temperaturabnahme mit der Höhe gewählt werden kann. Daraus wird die **Schallgeschwindigkeit** ermittelt (geht mit der Wurzel aus der Temperatur) und daraus die **Mach-Zahl** des Geschosses. Eine spiralförmige Blechschablone, die für jedes gerechnete Geschoss neu eingesetzt werden muss, wird durch die Mach-Zahl verdreht und liefert den **Geschwindigkeits-abhängigen Teil** des Luftwiderstandes. Der wird noch umgerechnet auf den **Luftdruck in der jetzigen Höhe** – und all das wird während der ganzen Geschossflugbahn laufend aktualisiert.

Ausgang des Rechners ist die **Verzögerung infolge Luftwiderstand**, die dann noch verrechnet wird mit einem **Anteil des Geschoss-Gewichtes** (je nach Steilheit der Flugbahn). Das alles geht auf den Geschwindigkeits-Integrator und lässt die Geschwindigkeit im richtigen Masse zu- oder abnehmen, gleich wie beim Füsgen-Gerät.

Der Rechner für den Luftwiderstand belegt den ganzen Tisch links:



Luftwiderstandsrechner von „Mariandl“ als Schema und in Metall gefertigt. Zentral oben die Schablone zum Auslesen der Geschwindigkeits-Abhängigkeit, Verdrehwinkel ca. 360° plus 90°, Abgriff von links her, dann sofort elektrische Nachführung des Wertes. Linke Hälfte: Bestimmung der Machzahl; rechte Hälfte: Barometerdruck als Funktion der ...

... Flughöhe, proportionale Umrechnung des Luftwiderstandes auf diesen Luftdruck. Unterer Rand diverse Handeinstellungen (z.T. während der Rechnung möglich) und Wahl der Temperaturabnahme mit der Höhe (dunkles Kästchen am unteren Rand, darüber Temperaturablesung). Hell links der Bildmitte: Nachlaufmotor zur Ablesung der Schablone $F(M)$.

Bilder aus Ref. 2, Stiftung HAM, Thun.

s: Schallgeschwindigkeit, q: Verzögerung durch Luftwiderstand.

B_0 , B_y : Barometer-Druck auf Normalhöhe, auf aktueller Höhe

Schema links 1942: Rechts unten kommt die gegenwärtige Flughöhe y aus dem Integrator und treibt die grosse Luftdruck-Walze an mit eingefräster Druck-Information (hier noch ohne Temperatureinfluss). Weiter geht die y -Welle zur einstellbaren Temperatur-Abnahme mit der Höhe, dann zur $1/s_T$ -Spirale, auf der die Schallgeschwindigkeit gespeichert ist. Von oben her kommt die Geschwindigkeit, wodurch die Position des Zapfens mitten im linken Schräghebel bestimmt ist. Seine Links-Rechts-Position ergibt die Mach-Zahl, welche die Spiral-Schablone (genannt „das Herz“) verdreht. Aus dem „Herz“ abgelesener Widerstand wird zum Schräghebel rechts geführt und bestimmt den gesuchten q -Wert (horizontale Position des q -Schlittens), der weiter zum Geschwindigkeits-Integrator geführt wird. Der Luftdruck ab Spirallille bestimmt den Winkel des schrägen Hebels.

Metall-Ausführung rechts 1948: Die y-Welle ist nicht sichtbar, liegt gemäss Plan 1948 neu unter dem Tisch. Das Schema links zeigt es noch anders (1942). Die Schallgeschwindigkeits-Spirale ganz links ist nur sehr klein, aber knapp sichtbar. Unten rechts sind drei Ableseskalen: Konstanten-Einstellung für Normdruck mit Handrad / grössere Skala Barometer in Flughöhe y / y (und rechts darunter ein Handrad zur Barometer-Nachstellung). Aussen herum sind bei beiden Schräghebeln schlecht erkennbare Skalen für Machzahl, v , Luftwiderstand als Funktion der Machzahl, Luftwiderstand q endgültig (d.h. auf den aktuellen Luftdruck reduziert).

Anlagen von Vannemar Bush (USA, hier nur knappe Erwähnung, ohne Einzelheiten)

Die zwei besprochenen Flugbahnrechner sind *genau für ihren Zweck* gebaut worden – d.h. exakt massgeschneidert. **Eine andere Verwendung verlangt nach einer anderen Maschine.**

Vannemar Bush (1890-1974) hat in den USA ähnliche mechanische Anlagen gebaut, bei denen eine **Umprogrammierung** möglich war für neue Aufgaben. Es gab eine Anzahl Eingabe-Einheiten, Anfangsbedingungen, dann Addierer, Integratoren, Plotter etc., die mittels langer Stangen (kreuz und quer liegend) je nach Bedarf miteinander zu verkoppeln waren.

Ein erstes Gerät „Differential Analyzer“ wurde **1928-32** gebaut mit rein mechanischen Mitteln, wie hier besprochen, aber deutlich grösser. Es gab **mechanische Drehmomentverstärker** statt elektrischer Nachführungen.

Bilder: https://ub.fnwi.uva.nl/computermuseum/vbush_tbl.html
<http://www.mit.edu/~klund/analyzer/>

Ein zweites Gerät **1942** wurde bereits mit 2000 Elektronenröhren bestückt und wog angeblich 100 Tonnen. Name: RDA2 (Rockefeller Differential Analyzer No.2). Das Gerät hatte 18 Integratoren und eine Genauigkeit bis auf 1Promille.

http://ethw.org/Differential_Analyzers

Th. Erismann von der Firma Amsler in Schaffhausen wusste von den Bush-Geräten. Er beurteilt sie als **schwerfällig**, denn der Umbau auf einen neuen Zweck sei sehr aufwändig. Eine massgeschneiderte Anlage zu genau nur einem Zweck habe im Betrieb grosse Vorteile. Das sagt aber der Amsler-Spezialist, der die eigenen Geräte verkaufen will (gefunden in: Separatdruck zur Vorstellung der neuen Amsler-Anlage mit sieben Integratoren ab 1955, siehe Ref. 2; bei der Foto wurde leider der Ort der Publikation abgeschnitten, ev. NZZ 12.9.1956, siehe Bilder 1056-1062. Bilder-Sammlung: vgl. p. 21).

Der Verfasser dieser Arbeit hat im Sommer-Semester 1967 an der ETH eine Vorlesung besucht von Th. Erismann über Integrieranlagen. Markenzeichen: Fliege. Später wurde Erismann Direktor der EMPA.

Anhang 1:

Bestimmung der Anfangsgeschwindigkeit des Geschosses

Diverse, meist komplizierte Texte finden sich zum **Gerät nach Le Boulengé**, das jahrzehntelang in den meisten Ländern die Mündungsgeschwindigkeit der Geschütze gemessen hat; Abbildungen dazu sind selten. Mit dem kurz nacheinander ausgelösten Fall zweier Metallstücke kann die Zeit bestimmt werden, die zwischen den beiden Auslösepunkten liegt:

Bildquellen nicht mehr bekannt
Internet

<p>Bild 55 Schaltbild des Apparates von Le Boulengé</p>	<p>eine Kontaktscheibe verwendet. Vor dem Schuß werden die Stäbe St_1 und St_2 an die Elektromagnete gehängt. Über den Stab St_1 ist eine Zinkhülle geschoben. Zerreißt das Geschöß zur Zeit $t = 0$ das Gitter, so fällt der Stab St_1 vom Elektromagneten E_1 ab. Nach der Zeit t zerreißt das Geschöß das Gitter 2, der Stab St_2 fällt und trifft den Teller T des Hebels H, der dadurch ein unter Federspannung stehendes Messer freigibt. Das Messer schnellert horizontal nach rechts und erzeugt eine Kerbe K_1 auf der Zinkhülle des Stabes St_1. Vor Beginn der Zeitmessung schlägt man als Nullmarke eine Kerbe K_1 in die Zinkhülle, indem man bei angehängten Stäben mit der Hand den Stromkreis II unterbricht. Zwischen der Auslösung des Stabes St_2 und dem Einschlagen des Messers in die Zinkhülle verstreicht eine gewisse Zeit, die eine Apparatkonstante darstellt und durch einen Vorversuch bestimmt wird, indem man die beiden Stromkreise mechanisch gleichzeitig unterbricht. Man erhält so die Kerbe K_1 (Disjunktionsmarke). Zu den Fallstrecken K_1K_3 bzw. K_1K_2 gehören die Fallzeiten $\sqrt{2 K_1 K_3 / g}$ bzw. $\sqrt{2 K_1 K_2 / g}$, somit ergibt sich die Flugzeit t des Geschosses längs der Meßstrecke s zu $t = \sqrt{2 K_1 K_3 / g} - \sqrt{2 K_1 K_2 / g}$. Der Wert $\sqrt{2 K_1 K_2 / g}$ wird im allgemeinen zu 0,150 s gewählt, was einer Strecke K_1K_2 von 110,37 mm entspricht. Der Kerbenabstand K_1K_2 bzw. K_1K_3 wird mit Hilfe eines besonderen Ablesemaßstabes auf $1/10$ mm genau abgelesen.</p>
<p>Mit der Zeitdifferenz fallender Metallstangen wird gemessen, wie lange der Schuss vom ersten Drahtgitter zum zweiten braucht.</p>	<p>Es gibt kleine Druckfehler: Dreimal wird das Zustandekommen von Kerbe 1 erklärt. Normaler Schuss gibt Kerbe 3. Beide Kreise miteinander trennen gibt Kerbe 2. Ganz ohne Fall: Kerbe 1</p>

<p>Rahmen und Gestell zum Spulen-Boulengé auf dem amerikanischen Versuchsplatz Aberdeen</p>	<p>Apparat nach Le Boulengé mit Spulen:</p> <p>Mit langen Stangen und Seilen werden die beiden Spulen in gebührender Entfernung von der Kanonen-Mündung befestigt. Bild aus Ref. 3. Spulenversuche durch P. Curti (Ref. 3) auf ca. 1926 geschätzt.</p> <p>Normalerweise wurden in einem Rahmen aufgespannte Drähte zerschossen. Diese Anlagen scheinen über viele Jahrzehnte zuverlässig funktioniert zu haben. Während des zweiten Weltkrieges sind in Deutschland fahrbare Equipen den Flak-Stellungen nachgefahren und haben sämtliche Geschütze reihum geprüft. Nach vielen Schüssen ist das Rohr abgenützt und die Mündungsgeschwindigkeit sinkt^{*)}. Das Kommandogerät muss wissen, wie hoch die Anfangsgeschwindigkeit ist. Allerdings kann nur <i>eine einzige</i> Mündungsgeschwindigkeit eingestellt werden für alle Geschütze einer Batterie.</p> <p>^{*)} siehe folgende Seite</p> <p>Erste Versuche Le Boulengé ab 1863, verwendet bis in den zweiten Weltkrieg. Ab ca. 1955 bis 1964 verwendete die Flab in der Schweiz eine moderne v_0-Bestimmung mit elektronischen Mitteln noch vor der Artillerie. Messbasis: Zwei Spulen im Abstand 1 m, direkt vor dem Rohr, kein Draht wird zerrissen. Z.T. mussten die Geschosse noch vormagnetisiert werden. Vgl. Bild unten. Das Boulengé-Gerät wurde in der Schweiz sporadisch bis 1974 verwendet.</p>
---	---

*) Gefunden bei der 12.8 cm-Flak in Deutschland:

Die Lebensdauer der Röhre betrug 1.000 Schuß, konnte aber im Laufe des Krieges auf 2.000 Schuß erhöht werden.

(„konnte“ oder „musste“ erhöht werden ??)



Die schweren 7.5 cm Flak Kanonen erhielten bereits eine feste Messbasis aufgesetzt, um die Anfangsgeschwindigkeit der Geschosse zu messen. Messbasis: 1 m. Versuche 1954, Einführung vor 1960.

In einem elektronischen Zähler wurde die Flugzeit durch die Messstrecke angezeigt mit einem Feld von Glühlampen. In vier Dekaden musste man sich von Hand die binären Werte notieren, alles zusammenzählen, dann in einer Tabelle den Wert für die Anfangsgeschwindigkeit nachschauen.

Prospekt Oerlikon ca. 1958, Korrespondenzen, Diskussionen und Messungen betreffend die Wahl der Systeme ca. **1954-1960** sind im Bundesarchiv vorhanden.

Der Zeitzeuge U.W., der **1962** seine RS mit den 7.5 cm-Geschützen gemacht hat, erinnert sich an die Messungen mit der v_0 -Messbasis. Sie waren normal, d.h. nicht nur für Versuche oder Einzelaktionen gedacht. Ab ca. **1941** gab es ein v_0 -Messgerät der AFIF-Gerät (ETH), das mittels Fotomultipliern *neben* der Geschossflugbahn mit einer 2m-Basis die v_0 gemessen hat – eher für Forschungszecke, nicht für die Truppe. Die Flak war bei der v_0 -Massbasis etwas früher als die Artillerie.

Bild aus dem Bundesarchiv, suchen unter: Vergleichsmessungen mit den v_0 -Messanlagen Weibel und Oerlikon.

Anhang 2:

Chronologie - Entwicklung der Anlage Curti-Dubois-Amsler: *Kursiv: Andere Rechner der Zeit*

1937 Curti schickt Unterlagen zu seinem Integraphen an einen Major und freut sich, anlässlich seines Besuches dessen Meinung zu erfahren. Ref. 2. Der Luftwiderstand wird anders gelöst (mit „Stäbchen“) als im später realisierten Gerät. Bilder 1070-1076. „Rollende Schneide und Integrierwagen“ sind erwähnt, die seien „vom Coradi-Integrgraphen bekannt“! Das wären also noch dieselben Integratoren wie beim Füsgen-Gerät.

1940 Eine frühe Form des Rechners ist abgebildet in Ref. 3, als „Flugbahn-Integrgraph Curti 1940, Konstrukteur Dr. Francis Dubois. Ausführung Haag-Streit, Bern“ (also noch nicht bei Amsler SH). Auf

der klaren Foto sind nur drei Integratoren zu sehen rings um den Zeichenplatz zum Hodograph, und zwar die klassischen Reibrad-Integratoren mit ebener Scheibe (also noch keine Kugel-Integratoren). Den vierten, unerlässlichen Integrator sieht man auf dem Bild nicht. Das Zeichenbrett $y(x)$ ist sichtbar, aber vom Luftwiderstandsrechner in seiner späteren Form sind erst geringe Anfänge sichtbar. Die Ähnlichkeit zur späteren Form ist augenfällig; von der Füsgen-Apparatur ist die Anlage sicher nicht inspiriert, umgekehrt auch nicht.

Im Buch von Curti 1945 sind die vier „Kugelintegratoren“ bereits erwähnt und das Schema ist wie in endgültiger Form gezeichnet. Ein Tip für den fehlenden Integrator des Prototypen ist dort zu finden: Curti gibt eine Möglichkeit an, mit einer einzigen Drehscheibe gleich **zwei** Integratoren zu bauen, mit Rollrädchen von oben und von unten her gleichzeitig.

März 43 Die KTA wünscht u.a., dass der Flugbahnrechner v_0 bis zu 1500 m/s verarbeiten soll (sehr hoch! Die 7.5 cm-Flabkanone bringt es auf $v_0 = 805$ m/s gegen Flugziele, 840 m/s gegen Panzer)

Mai 44 Die Wünsche des EMD / KTA werden durch die Firma Amsler beurteilt. Einiges kann man nicht machen (grosse Höhen über 14'000 müM, tiefer Barometerdruck bis 100 mm Hg). Durch Zerteilung des Bereiches werden Geschwindigkeitsbereiche sogar bis 2000 m/s ermöglicht – jenseits aller damals erreichbaren Werte. Man steht unmittelbar vor Vertragsabschluss (Bilder 1097-1103).

1948 Das Gerät wird durch die Firma Amsler AG gebaut (gemäss Angaben Stiftung HAM, Ref. 6). Ev. schon früher ?? Die Pläne sind auch schon 1942 detailliert gezeichnet worden. Eine ausführliche Gebrauchsanweisung stammt von 1948.

Ab **1950** (damals als Idee): Ein fünfter Integrator wird eingebaut: v resp. Luftwiderstand wird in zwei numerische Bereiche aufgeteilt, das sei günstiger so (Vorschlag der KTA, Bild 1047-1049, 1053).

*1953, 1955 Rechenarbeiten von R. Sängler Prof. ETH / W. Roth für **Geschossflugbahnen** auf dem gemieteten Digital-Relais-Rechner der ETH **Zuse Z4** (ca. 900 Std., einer der grössten Posten). Tabelle der Rechen-Aufträge: H. Bruderer. Die Z4 arbeitet mit ca. 2200 Relais und mit einem mechanischen Speicher, der 64 Zahlen aufnehmen konnte. Programmschleifen wurden realisiert durch zusammengeklebte gelochte Filmstreifen.*

1954/ 55 Entwicklung einer **neuen Flugbahn-Integrieranlage** durch die Firma Amsler. Die Kugel-Integratoren sind neu konstruiert, und die ganzen mathematischen Verbindungen neu aufgebaut worden (Bild nächste Seite). Es hat jetzt sieben Integratoren, sowie neue Einlese-Köpfe, welche auf Papier gezeichneten Funktionskurven optisch-automatisch nachfolgen. In Ref. 2 enthalten. (Bilder 922-947, 1056-1062). Die Multiplikation erfolgt nicht mehr mit ähnlichen Dreiecken – neu wird von beiden Variablen der Logarithmus gebildet, addiert, dann entlogarithmiert, alles mit Funktionstischen und optischem Kurven-Verfolgen. Es gibt noch keine elektrischen Integratoren, dort ist alles mechanisch.

1956 Die erste Anlage des Nachfolger-Typs wird durch die spanische Marine abgenommen. Die Berechnung von Raketenflugbahnen ist hier bereits eingebaut – das müssen ungesteuerte Raketen sein, deren Triebwerk man sehr gut kennt (Schubkraft, Massen-Abnahme).

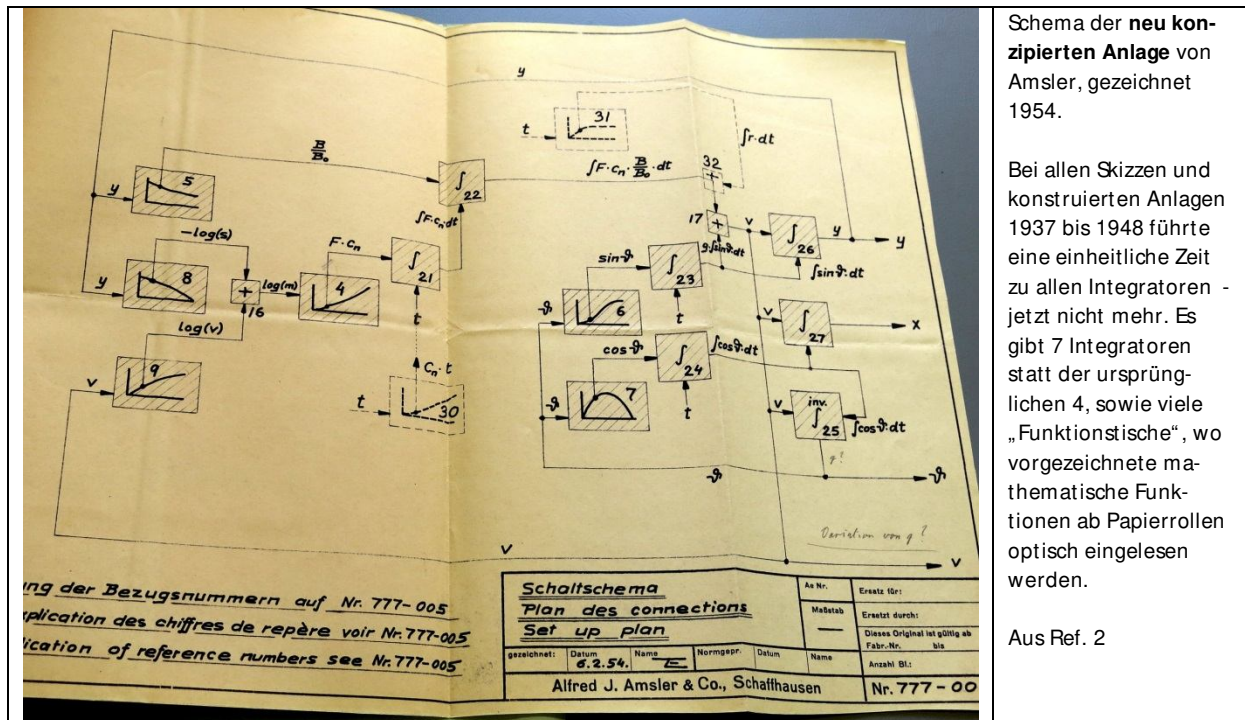
1956 Prof. Stiefel zeigt die Abbildung des *neuen* Amsler-Integraphen, mit dem kurzen Hinweis, dass die Sektion für Schiessversuche in Thun dieses Gerät verwendet (bisher einziger bekannter Hinweis). Quelle: E. Stiefel: „Rechenautomaten im Dienste der Kriegstechnik“, ASMZ, Bd. 122, 1956, Heft 11.

1957 Analogie-Rechengerät AR2 (Röhren), Herst. Güttinger AG, Anleitung von Prof. Erwin Engeler, mit elektrischen Integratoren. Zu finden über H. Bruderer

*1955, 1956, 1958 Integrieranlage 55, Analog-Rechner zu Feuerleitgerät 56 (Ur-Fledermaus), Integrieranlage 58, alles von **Contraves AG**. Digitale Rechner: **1956** Betriebsaufnahme ERMETH an der ETH, **1958** ZEBRA an der EPUL, Röhrenrechner.*

1959 Auftrag der KTA an die Firma Amsler zur Revision der alten fünf Kugelintegratoren bis spätestens Aug. 59 – die Anlage von 1948 steht sicher noch in Gebrauch. Gewisse Bestandteile am Antrieb der Integratoren 1 bis 4 sind „vom selben Typ wie bei der **Mehrzweckanlage**“ einzusetzen,

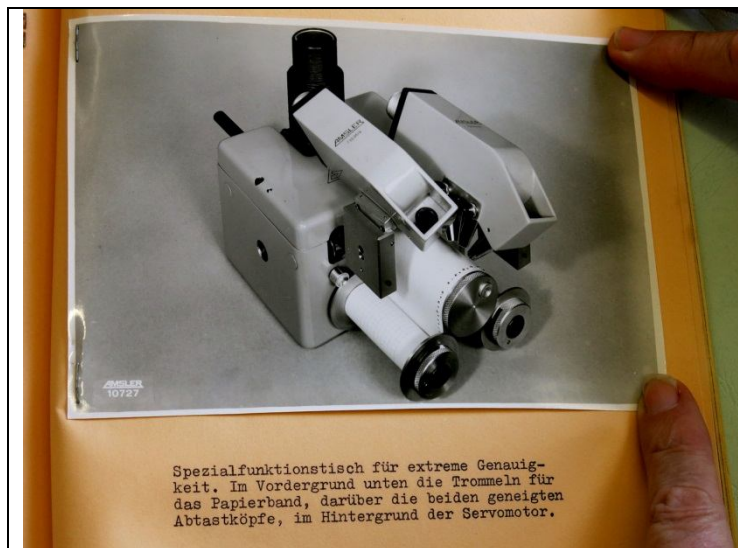
offenbar gibt es noch ein ganz anderes Gerät neben dem ballistischen Integraphen (ev. ein frei programmierbares Gerät ?). Vgl. dazu Bilder 1022, 1023, Brief KTA an Amsler, Sept. 1958.



Schema der **neu konzipierten Anlage** von Amsler, gezeichnet 1954.

Bei allen Skizzen und konstruierten Anlagen 1937 bis 1948 führte eine einheitliche Zeit zu allen Integratoren - jetzt nicht mehr. Es gibt 7 Integratoren statt der ursprünglichen 4, sowie viele „Funktionstische“, wo vorgezeichnete mathematische Funktionen ab Papierrollen optisch eingelesen werden.

Aus Ref. 2



Nichtlineare Funktionen werden mit präzisiertem Tusche-Strich auf das Papierband gezeichnet, und mit zwei optischen Abtastköpfen ausgelesen. Der Funktionswert überstreicht mehrfach die Papierbreite – bei Überlauf oben, beginnt die Kurve gleich nochmals am unteren Rand des Papierstreifens. Zum Auslesen hat es deshalb zwei Köpfe, damit immer einer am richtigen Ort bereit ist. Ein Lichtpunkt wird in einer Grösse von ca. 0.15 mm eingelesen, und die Regelung lässt den Funktionskopf immer entlang der Grenze zwischen weissem Papier und der einen Grenze des schwarzen Tusche-Striches nachfolgen.

Papierbreite 50 mm, kraftschlüssige Perforation. Optik, Fotozelle, Verstärker, Servomotor. Licht-Modulation für Unempfindlichkeit gegen Tages- und Lampenlicht. Aus Ref. 2

Bildnummern beziehen sich auf eine grössere **Sammlung von Fotografien** aus allerlei Archiven und Museen, mit insgesamt über 1200 Bildern und weiteren Dokumenten. Die Aufnahmen beziehen sich auf alle bearbeiteten Themen dieser Serie (Mechanische Rechenggeräte der Fliegerabwehr). Sofern alles klappt, stehen die Bilder einmal in der Bibliothek am Guisanplatz in Bern und im Flieger-Flab-Museum in Dübendorf für weitere Recherchen zur Verfügung.

Anhang 3

Unklares, Unverstandenes

Hodograph: Schon in den ersten greifbaren Ideen von P. Curti von 1937 ist die Aufzeichnung des Hodographs vorgesehen. Nur – weshalb eigentlich, wozu dient das ?

Der Hodograph ist die graphische Darstellung der Geschwindigkeit des Geschosses (Abstand vom Ursprung) als Funktion des Winkels, unter dem sich das Geschoss bewegt (Winkel gegen die Horizontale). Beispiel: Wurfparabel im luftleeren Raum, Abwurfwinkel des Steines unter 45° , $v_0 = 50 \text{ m/s}$. Unter 45° ist eine Strecke (in beliebigem Massstab) von 50 m/s abzutragen = Startpunkt. Der Winkel wird nach Abwurf immer kleiner, bis zum Scheitelpunkt. Dort oben hat der Stein noch eine Geschwindigkeit von 50 m/s mal $\cos 45^\circ$ und fliegt horizontal – der entsprechende Punkt im Hodograph liegt vertikal unter dem Startpunkt. Der Hodograph der Wurfparabel (Verbindung aller v-Pfeilspitzen) ist eine senkrechte Linie nach unten, ab Startpunkt. Beim Flug mit Luftwiderstand nähert sich der Hodograph stärker dem Ursprung an (Bild 1065, 1067).

Es ist nicht klar, wozu der Hodograph dient – wenn man die gesuchte Geschossflugbahn bereits fertig errechnet hat. **Idee, Vermutung:** Nach der Berechnung einzelner Geschossflugbahnen wird es viel Arbeit geben, um die in der Flugbahnkarte gedruckten Zwischen-Bahnen zu ermitteln, die gar nie gerechnet worden sind. Möglicherweise bietet der Hodograph Vorteile, um diese weiteren, nur interpolierten oder abgeschätzten Flugbahnen zu ermitteln. Eventuell sind diese Zwischenbahnen dank der benachbarten Hodographen besser zu ermitteln als allein aus den Bahnkurven $y(x)$. Das ist bloss eine Verlegenheits-Vermutung!

Luftwiderstand: Die gedruckten Flugbahnkarten sind nur dann genau, wenn der Luftwiderstand der Geschosse bei allen möglichen Geschwindigkeiten genau bekannt ist. Der Luftwiderstand kann offenbar mit wenigen gerechneten und auch geschossenen Flugbahnen bestimmt werden – es ist leider nicht klar, wie das damals geschah.

Hier eine **Vermutung**, die sich auf Phantasie und wenig Quellen abstützt. In Ref. 9, p. 336 findet sich eine Abbildung, die sich so interpretieren lässt: Auf dem hinteren Stativ steht die Kamera, die bei



Ref. 9, dort Figure 8, p. 336, mit folgendem Text dazu:

From left to right:
Maurice Garnier, Louis Fort, and
Gustave Lyon with measuring
instruments, undated.

From [Patard 1930, p. 275]

Interpretation: Oben rechts im Spalt ist die Linse der Kamera sichtbar, die auf dem Hauptstativ steht. Davor ein Shutter, die Elektrokabel ermöglichen eine schnelle Rotation der Scheibe. Die Leuchtspur des Geschosses wird dadurch zerhackt, in Teilstücke konstanter Zeitdauer zerlegt. Die Strecken sind aus der Foto zu ermitteln, d.h. v ist überall bestimmbar.

Nachtaufnahmen den Verschluss dauernd offen hält und die Flugbahn eines Leuchtspur-Geschosses aufnimmt. Auf dem vorderen Stativ dreht sich ein Ring mit bekannter Umlaufgeschwindigkeit und unterbricht periodisch den Strahlengang. Durch Ausmessen und Entzerren des Bildes ergibt sich die Geschwindigkeit des Geschosses auf dem ganzen Bahnabschnitt, daraus folgt die Abbremsung und die Bremskraft. Die Rotation der Drehscheibe muss aber genau bekannt sein, auch die Abstände zur Geschossflugbahn.

Schweiz ab 1940: Ballistische Kammer Wild; ein Paar elektrisch synchronisierter Fotoapparate macht Mehrfachbelichtungen vom Leuchtspurgeschoss, mit Stereo-Auswertung. Blickrichtung in Schussrichtung.

Quellen

1. Peter Füsgen: Flugbahn-Rechengerät. Dissertation zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs, Technische Hochschule Aachen, 1937. Die Schrift ist an der Bibliothek der ETH Zürich vorhanden, sowie in den Unterlagen zum Integrgraph nach Curti / Dubois bei der Stiftung HAM, Thun.
2. Unterlagen zum Flugbahn-Integrgraph genannt „Mariandl“ von P. Curti und F. Dubois; Ideen von ca. 1937 bis 1959; mehrere Kartons gemischter Unterlagen, Korrespondenzen, Pläne, Fotos etc. in der Stiftung HAM, Thun.
3. Paul Curti: Einführung in die äussere Ballistik, 1945. Verlag Huber & Co., Frauenfeld
4. P. Curti, F. Dubois: Die mechanische Lösung des ausserballistischen Hauptproblems. In: Schweizerische Bauzeitung, 67, 1949, p. 52-54. <http://dx.doi.org/10.5169/seals-83990>
5. Jenaer Jahrbuch zur Technik- und Industriegeschichte, Bd. 11, 2008. Hrsg. Verein Technikgeschichte in Jena e.V.
6. Der Integrgraph von Curti-Dubois-Amsler ist durch die Stiftung HAM restauriert worden, siehe dazu das Bulletin 3/10 der Stiftung HAM), ab Seite 20:
Antonin Tarchini, Tim Hellstern, Henri Habegger: Konservierungs- und Restaurierungsarbeiten an einem Ballistik-Integrgraphen von 1948. Die Adressen ändern andauernd wieder... suchen unter <http://www.armeemuseum.ch> dort von Hand Bulletin VSAM suchen: Nr. 3, 2010
7. Oberstingenieur Alfred Kuhlenkamp (Wehrmacht): Flak-Kommandogeräte, VDI-Verlag, 1943
8. Eugen Willerding: Die mathematische Theorie ballistischer Kurven, 2017. Intensive mathematische Abhandlungen zu allerlei Flugbahnen mit Luftreibung, auch Raketen und Satelliten. Anspruchsvoll! Im Internet im vollen Wortlaut zu finden unter: www.eugen-willerding.de
9. (**Ballistik 25 Jahre früher, 1. Weltkrieg**) David Aubin: I'm just a mathematician. Why and how mathematicians collaborated with military Mathematicians and Ballisticians at Gâvre, 2010. Ballistik in der militärischen Gâvre-Kommission in Frankreich, vor/während des 1. Weltkrieges. 44 Seiten
<http://hal.upmc.fr/hal-00639895v2> (dort „Fichier“ anklicken), oder:
<https://hal-univ-diderot.archives-ouvertes.fr/hal-00639895/document>

p. 322, 323: immer feinere, immer absurdere Annäherungen der „Formel“ für den Luftwiderstand.

p. 329, 330, Verhältnisse vor der seriösen Arbeit der Mathematiker, anfangs 1. WK: Es muss grosse Differenzen gegeben haben zwischen den vorbereiteten Reichweite-Tabellen und den Beobachtungen der Truppen:

Some artillery units lost confidence in the tables computed by theoretical means and corrected them on their own by experimental means. "Thus instead of having a single range table carefully established in the rearlines, there were many built with the help of a very large number of shots carried out in lousy experimental conditions."

The electrical engineer Hippolyte Parodi, underscored that he had first become aware of the initial insufficiency of firing tables while he was fighting on the front:

« When I was called to head the Service de balistique et de préparation des tables de tir, I had long been aware, according to the shots I had taken or controlled on the front, that the near totality of firing tables in use in the Army were clearly false and that they had been established . . . through "archaic," inexact and simplified methods. »

The tables, Parodi went on, were not only wrong; they were also inconsistent and self-contradictory. Some projectile might, for example, have, for the same line of departure, a greater range for a smaller initial velocity.

p. 334-339 gibt eine Idee des Aufwandes, den die Mathematiker ca. 1915-1917 leisten mussten, um gerechnete Schussbahnen auf eine praktikable Genauigkeit zu bringen. Knapp, aber leider unverständlich sind Schuss-Beobachtungen und -Vermessungen erwähnt, p. 338. Nirgends werden in diesem Text mechanische Rechen-Hilfen erwähnt (Füsgen, diese Arbeit p.11). Ref. 9 hat ein ausführliches Literatur-Verzeichnis.

10. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01187210/document> (Dominique Tournès, 2013, Europ. Math. Soc.) Überblick über historische Versuche, die Mathematik der Flugbahn anzupassen – und umgekehrt. „**Die Ballistik war das Labor zur Entwicklung der Mathematik!**“

Zu Ref. 3, 4: Curti Paul, 1882-1965, war 1927-1947 Ordinarius für Militärwissenschaften an der ETH. Er wird die treibende Kraft gewesen sein zum Bau des ballistischen Integraphen, sah die militärischen und ballistischen Notwendigkeiten. Dr. F. Dubois hat alles ingenieurmässig in eine mechanisch realisierbare Form gegeben, sowie den Luftwiderstandsteil geplant. Die Maschinenfabrik Alfred J. Amsler & Co in Schaffhausen hat das Gerät gebaut, wahrscheinlich als Einzelgerät (?).

Zu Ref. 4: Eine schöne Stelle (p. 54) soll hier wörtlich wiedergegeben werden, aus dem Jahre 1949:

„Für sehr grosse Geschwindigkeiten über 12'000 m/s fällt das Geschoss nicht mehr auf die Erde zurück, sondern beschreibt als Trabant seine Bahn um den Zentralkörper. Für diesen Fall haben wir nach den gleichen Prinzipien einen **Planeten-Integraphen** erdacht. Da aber die Astronomen die Planetenbahnen berechnen können, hat dieser zunächst wenig Aussicht auf Realisierung, interessant wird er erst bei Betrachtung der Störungen, wo der erste Trabant durch einen zweiten gestört wird und der zweite durch den ersten. Sobald dann bei diesem „**Dreikörperproblem**“ die Massen der Trabanten gegenüber der Masse des Zentralkörpers nicht mehr vernachlässigt werden dürfen, ist die mechanische Lösung am Platze.“

Winzige sprachliche Präzisierung: Mit Kanonen kann kein Satellit in eine Umlaufbahn geschossen werden – er müsste ja wieder zum Abschussort zurückgehen, d.h. die Erde durchstossen. Das Dreikörperproblem bleibt trotzdem interessant!

Verfasser: André Masson, Langenthal, Schweiz

Februar 2017 - Mai 2017

Dies ist die **neunte Arbeit** zu den **mechanischen Rechnern der Fliegerabwehr** zur Zeit des zweiten Weltkrieges.

Erste Arbeit: Kommandogerät SPERRY
Zweite Arbeit: Kommandogerät GAMMA-JUHASZ-HASLER
Dritte Arbeit: Diverse Geräte der Fliegerabwehr: Distanzbestimmungen, Kontroll- und Schulungsgeräte
Vierte Arbeit: Rechnen mit Formkörpern
Fünfte Arbeit: Kommandogerät zur 34mm Kanone (Winkelgeschwindigkeits-Gerät)
Sechste Arbeit: Frühe CONTRAVES-Geräte: Stereomat, Verograph, Oionoskop
Siebente Arbeit: Horchortung: Elascop und Orthognom
Achte Arbeit: Kurvenflug-Rechner